

Modellierung und Analyse urbaner informeller Siedlungen für infrastrukturelle Planungen

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

eingereichte

D I S S E R T A T I O N

vorgelegt von

John Friesen, M. Sc.

aus Darmstadt

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz
Mitberichterstatter:	Dr. rer. nat. habil. Hannes Taubenböck
Tag der Einreichung:	02.02.2021
Tag der mündlichen Prüfung:	05.05.2021

Darmstadt 2021

D 17

Friesen, John: Modellierung und Analyse urbaner informeller Siedlungen für
infrastrukturelle Planungen

Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2021

urn:nbn:de:tuda-tuprints-194144

Tag der mündlichen Prüfung: 2. Februar 2021

Veröffentlicht unter CC-BY-NC 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses>

Vorwort des Herausgebers

Kontext – die Attraktivität von Städten als Grund für Migration und Infrastruktur

Als Menschen leben wir in wenigen kleinen Kreisen, gebildet aus Familie, Freunden, Kolleginnen. Wir streben nach Gesundheit und Wohlbefinden. Dafür sind wir auf den Austausch von Ideen, Dienstleistung und Waren angewiesen. Dieser Austausch gelingt dort besonders gut, wo Kommunikation stattfindet, die Zusammenarbeit einfach ist und Waren effizient transportiert werden.

Dies ist ein Grund dafür, dass das Zweistromland die Wiege unserer Kultur ist: dort sorgen die Flüsse Euphrat und Tigris nicht nur für die Ernährung, sondern auch für den Dialog, die Zusammenarbeit und den Warenverkehr der Menschen. Am Ufer von Flüssen und Meeren, an den Kreuzungen von Handelswegen, d.h. auch an Furten tauschen sich Menschen aus. Die Marktplätze dienten als Nukleus für Siedlungen.

Das Befrieden von Bedürfnissen hat zwei Seiten, nämlich auf der einen Seite das Äußern oder Wecken von Bedürfnissen, aber auch die Befriedung durch Innovation, die Ideen, Produktion und Vertrieb. Beides geschieht offensichtlich in urbanen Regionen besonders gut und daran ändern auch mittlerweile global kurzweilige Kommunikations- und Transportinfrastrukturen nichts. Im Gegenteil, trotz Internet und Digitalisierung nimmt die Attraktivität von Städten zu, mit dem (erwarteten) Ergebnis, dass im Jahr 2030 zwei von drei Menschen in einer Stadt leben werden. Die Störung dieses Migrationsprozesses durch die Pandemie in den Jahren 2020 bis 2021 beachtet diese Vorhersage noch nicht, wird aber vermutlich vernachlässigbar klein sein.

Stadt und Stadtinfrastruktur gehen immer Hand in Hand. Zumeist stehen der Bevölkerungsdruck bzw. das daraus erwachsene Problem am Anfang und die Infrastruktur entsteht als Reaktion auf dieses Problem. Dies gilt sowohl für die Friedhöfe in Paris, als auch für die Wasserversorgung von London im 18. und 19. Jahrhundert.

Infrastruktursysteme erfüllen die grundlegenden Bedürfnisse der Menschen, z.B. nach sauberem Wasser. Ein Wasserversorgungssystem ist ein Netzwerk mit Quellen und Senken. Die Senken sind die einzelnen Menschen, Familien oder interurbane Strukturen wie Stadtteile. In sehr schnell wachsenden Städten im Globalen Süden sind diese Stadtteile nur sehr selten mit „Vierteln“ einer Planstadt zu vergleichen. Vielmehr entstehen diese Teile dynamisch durch Migration. Ist die Größe dieser Stadtteile bekannt, kann sich die Planung und der Betrieb der Infrastruktur danach richten.

Forschungsfrage(n) – Was sind die typischen Skalen von Städten?

Im Jahr 2017 hat mich Herr Dr.-Ing. Sören Brodersen, damals Entwicklungsleiter der Fa. KSB, einem führenden Pumpenhersteller, nach der typischen Größe von intra-urbanen Strukturen gefragt. Für ein Maschinenbauunternehmen sind die Fragen nach dem Markt mindestens so wichtig wie die Frage nach der Technologie. Motiviert durch diese Frage haben wir im August 2015 einen Projektantrag mit dem Titel „Strukturbildung in Mega-Cities modelliert über ein Reaktions-Diffusions-Modell“ eingereicht. Ich bin der KSB-Stiftung sehr dankbar, dass diese den Mut hatte, solch ein riskantes Forschungsvorhaben zu fördern. Dankbar bin ich auch einen für das Thema brennenden Doktoranden gefunden zu haben. Er hat auf meine Anregung hin, „Modellierung kann jeder, die empirische Validierung ist wichtig“, den sehr fruchtbaren Kontakt zu den Geographen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) gesucht und gefunden. Andere Fördermittelgeber wie u.a. die Deutsche Forschungsgemeinschaft fördern das Bestehende. Dies führt zu einer Verstärkung bewährter oder zumindest bekannter Ideen entsprechend dem Matthäus-Effekt, aber nicht zur Entstehung neuer Ideen. In seinen Forschungsjahren beantwortet Herr Friesen folgende vier Fragen:

- (i) Lässt sich die Stadtmorphogenese über ein Migrationsmodell mit möglichst wenigen Annahmen modellieren?
- (ii) Gibt es eine typische Größe, d.h. eine Skala für intra-urbane Strukturen?
- (iii) Welche empirisch begründeten Aussagen folgen aus Fern-Feld-Erkundungsdaten über intra-urbane Strukturen?
- (iv) Wie sieht die Übertragung bei inter-urbanen Strukturen aus?

Modellbildung - „des Pudels Kern“

John von Neumann, der als einer der einflussreichsten Mathematiker (und Informatiker) des letzten Jahrhunderts gilt, sagte:

"With four parameters I can fit an elephant, with five I can make him wiggle his trunk".

Dies ist als scharfe Kritik an Nuancenreichtum von Modellen zu verstehen, die wir uns im Zuge einer Euphorie für die sogenannte „künstliche Intelligenz“ immer wieder vor Augen führen sollten. Schnell ist Kausalität und Korrelation verwechselt. Das Gegenmodell ist die Suche nach des „Pudels Kern“.

Dieser Ruf wird jüngst auch in den Sozialwissenschaften, in der Modelle sich durch Nuancenreichtum negativ auszeichnen, laut. Bei der Entstehung von Stadtstrukturen sind zwei Modelle denkbar, erstens die Strukturbildung an Keimen und zweitens die Bildung von dissipativen Strukturen.

Erstens, Strukturbildung durch Keime: Denkt man über die Entstehung von Mustern nach, dann fällt uns zunächst das Wachsen von Mustern an Keimen ein. Dies beobachten wir z.B. beim Wachsen von Schneeflocken. Allgemein der Phasenwechsel wie Kondensation oder Kristallisation beginnt an ausreichend großen Quellen. Die Strukturen wachsen solange, bis die Objekte aneinanderstoßen. Diesen Vorgang beobachtet man auch bei Städten, so beim Zusammenwachsen von Bessungen und Darmstadt im 19. Jahrhundert. Die Anzahl der Stadtteile pro Flächeneinheit, die Keimdichte, verändert sich bei diesem Wachstumsprozess nicht, die relative Flächenbelegung sehr wohl. Überträgt man diesen Gedanken auf informelle Siedlungen, die „Slums“ genannt werden, so könnten Slums an Keimstellen solange wachsen, bis das Wachstum z.B. die Versorgung mit Wasser begrenzt ist.

Zweitens, Bildung von dissipativen Strukturen z.B. durch Turing-Instabilität: Strukturen, die an Keimen entstehen, hängen von der Keimdichte und den Wachstumsprozessen ab. Im Gegensatz dazu sind dissipative Strukturen, im speziellen Turing-Muster, intrinsische Eigenschaften eines dynamischen Systems. In einem schönen Deutschen Wort zusammengefasst: Die Turing-Muster sind Eigen-Muster des Systems und damit unabhängig von den Randbedingungen, den Störungen oder der Größe des Gebietes unter der Voraussetzung, dass die Muster viel kleiner als die Stadterstreckung sind, was praktisch immer gegeben ist. Solche Eigenwerte haben erfahrungsgemäß einen hohen intellektuellen Reiz, da sie in der Tat den Kern der Dynamik offenlegen.

Herr Friesen zeigt, indem er die bekannte lineare Stabilitätsanalyse des Reaktions-Diffusions-Systems auf Migration überträgt, dass eine notwendige Bedingung für die Segregation von relativ armen und relativ reichen Menschen als

$$d := \frac{\text{Mobilität reich}}{\text{Mobilität arm}} > \frac{\text{Abstossung reich} \leftrightarrow \text{reich}}{\text{Attraktivität arm} \rightarrow \leftarrow \text{arm}}$$

formuliert werden kann, Gleichung 3.15. Die notwendige und hinreichende Bedingung für das Verhältnis der *short distance migration* d ein kritischer Wert d_c der vollständigen Jacobi-Matrix der *short distance migration* abhängt. Für $d > d_c$ kommt es zu einer Bifurkation mit der Ausbildung von räumlichen Wellen, Abb. 3.3. Schön ist nach meinem Dafürhalten die Interpretation der Jacobi-Matrix mit dem generellen Verhalten von Menschen bei der Migration, Abschnitt 3.3.1.

Empirische Verifikation

Der Titel des Artikels „Similar Size of Slums” erschienen in Habitat International im Jahr 2018 fasst das empirische Ergebnis der Arbeit von Herrn Friesen bereits im Titel zusammen. Die Untersuchung von informellen Siedlungen in Sao Paulo, Dhaka, Rio de Janeiro, Mumbai und Manila zeigen je eine Fläche von 1.3 ha, Abb. 4.4, und eine Dichte der informellen Siedlungen von 2.9 %, Tab. 4.2.2. In den genannten Städten ist die Größenverteilung der informellen Siedlungen logarithmisch normalverteilt. In Caracas, Kapstadt und Kairo sind, vermutlich durch Stadtplanung bzw. Stadtpolitik, die Verteilungen nicht logarithmisch normalverteilt.

In seinen Untersuchungen hat Herr Friesen mehr als 7000 informelle Siedlungen untersucht. Weiterhin hat Herr Friesen das Konzept des average nearest neighbors (ANN) angewendet, um die intra-urbanen Siedlungen auf Regelmäßigkeit hin zu untersuchen. Darüber hinaus hat Herr Friesen aber nicht nur intra-urbane Siedlungen, sondern auch die Struktur von inter-urbanen Siedlungen untersucht. Auf diese Arbeit von Henn, Friesen et al. wird in der vorliegenden Dissertation weniger der Fokus gesetzt.

Darmstadt, im April 2021
Peter Pelz

Vorwort

Die Verstädterung ist einer der prägenden Prozesse der Menschheit. Ich durfte mich während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter intensiv mit diesem Phänomen und der damit verbundenen Entstehung informeller Siedlungen auseinandersetzen. Dabei wurde mir schnell bewusst, wie vielfältig die Perspektiven auf eine solch komplexe Thematik sind. Das Kennenlernen einiger mir vorher fremder Sichtweisen, wie die der Fernerkundung, sowie die vertiefte Auseinandersetzung mit meinem eigenen fachlichen Blickwinkel, haben diese Zeit für mich sehr wertvoll gemacht.

Andererseits hat mich die Beschäftigung mit der informellen Siedlungsbildung und die damit häufig einhergehende Armut demütig gemacht. Meine Sicht im Rahmen der Forschung ist immer eine privilegierte Sicht *von oben* gewesen. Ich schreibe diese Zeilen in einer warmen Drei-Zimmer-Wohnung mit Internetanbindung, fließendem Wasser und einer funktionierenden Abwasserentsorgung. Armut habe ich in meinem Leben nie erfahren müssen und bin mir dieses unverdienten Privilegs durchaus bewusst.

Gleichzeitig habe ich die Hoffnung, dass die häufig anzutreffende dystopische Sicht auf diese Siedlungsareale nicht das Ende beschreibt, sondern dass der Prozess der Verstädterung die Versprechen, die er in sich trägt, auch einlösen kann. Vielleicht kann die hier beschriebene Forschung einen kleinen Teil dazu beitragen.

Urbanisierung, Forschung und *alles wirkliche Leben ist Begegnung*, wie Martin Buber sagt. Diese Erfahrung habe ich in den letzten Jahren vielfältig machen dürfen, denn ohne die Unterstützung vieler Personen, denen ich in den letzten Jahren *begegnet* bin, wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Ihnen gilt der folgende Dank.

Zuerst sei hier mein Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz erwähnt. In einer lehrreichen Mischung aus positiver Rückmeldung, ehrlicher Kritik und der mir ermöglichten Freiheit, eigene Forschungsideen umzusetzen, konnte ich meine Perspektive erweitern und schärfen. Vor allem der Mut die Kreativität als Teil und nicht als Gegensatz von wissenschaftlichem Arbeiten zu verstehen, hat mich geprägt. Dafür bin ich ihm sehr dankbar.

Weiterhin bedanke ich mich bei Dr. Hannes Taubenböck vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt für die Übernahme des Korreferats, die Bereitstellung der verwendeten Forschungsdaten und vor allem für die Wertschätzung sowie das Vertrauen, das er mir entgegen gebracht hat. In den zahlreichen Diskussionen und dem darin stattfindenden interdisziplinären Austausch mit seinem Kollegen Dr. Michael Wurm habe ich viel gelernt.

VI

Der KSB-Stiftung danke ich für die dreijährige Förderung des Forschungsprojektes, die das offene Suchen, das in dieser Arbeit beschrieben wird, erst ermöglicht hat.

Weiterhin bin ich meinen Kolleginnen und Kollegen, von denen ich Dr. Lea Rausch, Dr.-Ing. Christian Schänzle, Ingo Dietrich, Jakob Hartig und Martin Pietsch besonders hervorheben möchte, für die vielen kritischen fachlichen und gleichzeitig freundschaftlichen Gespräche dankbar. Sie halfen mir meine Gedanken klarer zu formulieren und waren mir immer wieder ein wertvolles Gegenüber. Auch den Studierenden Christoph Knoche, Katharina Henn und Bartosz Prokop möchte ich für ihren Fleiß und ihren Beitrag zu dieser Arbeit danken.

Die Möglichkeit sich intensiv mit Fragen auseinander zu setzen, ist nicht selbstverständlich, sondern braucht Freiräume. Deshalb möchte ich meiner Schwiegermutter und meinem im letzten Jahr verstorbenen Schwiegervater für die Unterstützung in der Betreuung unseres Sohnes und die dadurch entstandene Möglichkeit zum Verfassen dieser Arbeit herzlich danken.

Ein weiterer Dank gilt meinen Schwestern, die mir in den letzten Jahren mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben und im Speziellen meiner Schwester Jenny Friesen für die Durchsicht der Arbeit.

Einen herzlichen Dank möchte ich meinen geliebten Eltern Peter und Helene Friesen aussprechen, die mir durch finanzielle Unterstützung aber vor allem durch ihren liebevollen Zuspruch die Sicherheit und Möglichkeit gegeben haben, meinen Interessen und Talenten nachgehen zu können.

Der letzte Dank gilt den beiden für mich wichtigsten Menschen. Meinem Sohn Theodor David, der mir durch das gemeinsame Toben wunderbare Pausen im Schreibprozess verschaffen hat und von dem ich die Offenheit für das Leben immer wieder lernen darf. Und natürlich meiner liebsten Victoria, mit der ich in den letzten Jahren durch wunderbare Höhen und traurige Tiefen gegangen bin. Sie schuf mir Freiräume und ermutigte mich stets. In Liebe widme ich ihr diese Arbeit.

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen, selbständig verfasst habe.

Darmstadt, am 2. Februar 2021
John Friesen

*Und Gott der HERR pflanzte einen Garten in Eden gegen Osten
hin und setzte den Menschen hinein, den er gemacht hatte.*

Genesis 2,8

*Und ich sah die heilige Stadt, das neue Jerusalem, von Gott aus
dem Himmel herabkommen.*

Apokalypse 21,2

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Forschungsfragen	10
1.2	Aufbau der Arbeit	10
2	Grundlagen zu informellen Siedlungen	13
2.1	Stadtdefinitionen	14
2.2	Polarität von Städten	16
2.3	Historie, Definition und Eigenschaften informeller Siedlungen .	18
2.4	Infrastrukturen	24
2.5	Erfassung und Modellierung	27
2.5.1	Erfassung	27
2.5.2	Zeitliche Entwicklung	32
2.5.3	Modellierungsansätze	33
2.6	Städte als Organismen	35
3	Modellbildung	39
3.1	Grundlegende Arbeiten	39
3.2	Beschreibung informeller Siedlungen auf Grundlage einer Turing-Instabilität	49
3.3	Lineare Stabilitätsanalyse	52
3.3.1	Fernmigration	54
3.3.2	Kurzstreckenmigration	56
3.3.3	Dispersionsrelation, Bifurkation und Modenselektion .	58
3.4	Simulationsbasierte Analyse	61
3.4.1	Schwellwert zur Erzeugung binärer Muster	61
3.4.2	Zeitliche Entwicklung eines Turing Musters	62
3.5	Modellinterpretation	63
4	Empirische Analyse	67
4.1	Daten und Methoden	67
4.1.1	Siedlungsdaten	67
4.1.2	Statistische Analysen räumlicher Muster	72
4.2	Ergebnisse	76
4.2.1	Häufigkeitsverteilungen der Grundfläche	76
4.2.2	Siedlungsdichte	84
4.2.3	Räumliche Verteilung	86

5	Diskussion	89
5.1	Modellbewertung	90
5.1.1	Korrektheit	91
5.1.2	Zulässigkeit	97
5.1.3	Zweckmäßigkeit	102
5.2	Philosophische und modelltheoretische Einordnung	105
5.3	Modellerweiterungen und Anwendungen	109
5.4	Modelle als Gegenüber	114
6	Zusammenfassung und Ausblick	119
	Literatur	123
A	Anhang	144
A.1	Alternative Entdimensionierung und Reaktionskinetik	144
A.2	Kontextuelle Darstellungen morphologischer Slums	147
	Eigene Veröffentlichungen	149

Symbolverzeichnis

Die Symbole der ersten Spalte werden in der zweiten Spalte beschrieben. Die dritte Spalte, wenn vorhanden, gibt die Dimension als Monom mit den Basisgrößen Länge (L), Masse (M), Zeit (T), Temperatur (Θ) und elektrischer Strom (I).

Lateinische Symbole:

Symbol	Beschreibung	Dimension
A	Fläche	L^2
A_{Ges}	alle Elemente umschließende rechteckige Fläche	$1 / L^2$
A_{INF}	dimensionslose Summe aller Flächen der modellierten informellen Siedlungen	1
A_{MS}	Summe der Flächen aller morphologischen Slums in einer Stadt	L^2
A_{Stadt}	Grundfläche der morphologisch erfassten Stadt	L^2
\hat{A}	geometrisches Mittel der Flächen der morphologischen Slums	L^2
a_{ij}	Jakobi-Matrix	1
b_{ij}	Matrix zur Analyse der Systemstabilität unter Einfluss von Diffusion	1
b_P	Puffer	L
C	Grenze einer Stadt	L
c_1, c_2	Reaktionskonstanten in der Schnakenberg-Kinetik	1
d	Diffusionszahl	1
d_c	kritische Diffusionszahl	1
d_o	Diffusionszahl größer als d_c	1
d_u	Diffusionszahl kleiner als d_c	1
d_{ij}	Matrix der Diffusionszahlen	1
D_x	Diffusionskoeffizient	$L^2 T^{-1}$
f_i	Reaktionskinetik	1
\vec{J}_i	Strom über die Systemgrenze	LT^{-1}
k	Wellenzahl	1
k_B	Boltzmannkonstante	$L^2 M T^{-2} \Theta^{-1}$

L	Gebietslänge	1
l_M	dimensionsloser Durchmesser einer modellierten informellen Siedlung	1
\tilde{l}_M	Durchmesser einer modellierten informellen Siedlung	L
N	Anzahl	1
\vec{n}	Normalenvektor auf die Systemgrenze	1
R	Regelmäßigkeit	1
\hat{R}	Reaktionsrate	T ⁻¹
r_A	Abstand zum nächsten Nachbar in einer zufälligen Punktverteilung	L
r_E	Abstand zum nächsten Nachbar in der untersuchten Punktverteilung	L
r_i	Abstand zum nächsten Nachbar	L
S	Entropie	L ² MT ⁻² Θ ⁻¹
T	Temperatur	Θ
t	dimensionslose Zeit	1
\tilde{t}	Zeit	T
U_x	homogene Lösung der Reaktionsgleichung f_i	L ⁻²
\hat{U}	maximale Bevölkerungsdichte in einer Stadt	L ⁻²
\tilde{u}_x	Bevölkerungsdichte	L ⁻²
u_x	dimensionslose Bevölkerungsdichte	1
x	dimensionsloser Ort	1
\tilde{x}	Ort	L
z	z -Wert zur Beschreibung der Standardabweichung	1

Griechische Symbole:

Symbol	Beschreibung	Dimension
α_x	Flächenanteil morphologischer Slums in einem Sektor	1
β_x	relativer Anteil morphologischer Slums in einem Sektor	1
γ	Maßstabsfaktor	1
ϑ	Schwellwert	1
λ	Wellenlänge	1
μ	Mobilität	TM ⁻¹
σ	Wachstumsrate und Eigenwert	1
σ_A	logarithmische Standardabweichung	1
σ_c	Standardabweichung des Abstands in einer zufälligen Punktverteilung	L
Φ	Siedlungsdichte	1
Ω	Anzahl möglicher Mikrozustände, die einen Makrozustand eines Systems beschreiben	1

Sonstige:

Symbol	Beschreibung
\oint	Ringintegral
D/Dt	allgemeine Zeitableitung
$\partial/\partial x$	partielle Ortsableitung
$\partial/\partial t$	partielle Zeitableitung
∇	Nabla-Operator
Δ	Laplace-Operator
\mathcal{R}	Realteil von

Indices

Index	Beschreibung
1	auf <i>arme</i> Bevölkerungsgruppen bezugnehmend
2	auf <i>reiche</i> Bevölkerungsgruppen bezugnehmend
i, j, k	Index und Laufvariable
FM	Fernmigration
KM	Kurzstreckenmigration
max	maximal
min	minimal
dom	Dominant
I - V	Sektoren der Größenordnung von morphologischen Slums

Abkürzungen

Kürzel	Bedeutung
Mio.	Millionen
vgl.	vergleiche
engl.	englisch

Kapitel 1

Einleitung

*Von dem, was du erkennen und messen willst,
mußt du Abschied nehmen, wenigstens auf eine Zeit.*

*Erst wenn du die Stadt verlassen hast, siehst du,
wie hoch sich ihre Türme über die Häuser erheben.*

Friedrich Nietzsche¹

Die Menschheit lebte über Jahrtausende hinweg vorwiegend in ländlichen Räumen². Diese Situation begann sich vor etwa drei Jahrhunderten zu ändern. Seither hat sich der in Städten lebende Anteil an der Gesamtbevölkerung stetig erhöht. Dieser als Urbanisierung bezeichnete Prozess wird als die größte und bisher letzte umfassende Migrationsbewegung der Menschheit bezeichnet³. Zu Beginn des 21. Jahrhunderts lebte das erste Mal in der Menschheitsgeschichte die Mehrheit der Bevölkerung in städtischen Räumen⁴ und es ist zu erwarten, dass sich dieser Anteil bis zum Jahr 2030 auf 60% erhöhen wird. Dies entspricht 5.17 Milliarden Menschen⁵.

Städte haben sich dabei zu Innovationstreibern und zentralen wirtschaftlichen, politischen und kulturellen Zentren von Regionen entwickelt⁴. Etwa 80% der weltweiten Wirtschaftsleistung wird in Städten generiert⁶. Gleichzeitig korreliert der Anteil an in Städten lebender Bevölkerung eines Landes mit

¹ 1844-1900, Deutscher Philologe und Philosoph. Zitat aus: *Menschliches, Allzumenschliches*, 1878.

² BERRY, „Urbanization“, ([14], 2008)

³ SAUNDERS, *Die neue Völkerwanderung - Arrival City*, ([187], 2013)

⁴ UNITED NATIONS, *Urbanization and development*, ([222], 2016)

⁵ UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS UND POPULATION DIVISION, *World urbanization prospects*, ([223], 2019)

⁶ GRÜBLER UND FISK, *Energizing sustainable cities: assessing urban energy*, ([73], 2013)

dessen Wirtschaftswachstum⁷.

Den Potentialen erhöhter Produktivität und Innovationskraft durch die kurzen räumlichen Distanzen zwischen Menschen stehen große Herausforderungen gegenüber⁷. So tragen Städte durch den in ihnen emittierten Kohlenstoffdioxid signifikant zum Klimawandel bei⁸. Weiterhin ist die Bereitstellung von adäquatem Wohnraum und Infrastrukturen für die in vielen Teilen der Erde schnell wachsenden Bevölkerung, zur Erfüllung unterschiedlicher menschlicher Bedürfnisse wie Sicherheit, Wasser, Hygiene, Gesundheit oder für den Transport, eine große Herausforderung.

Die dadurch entstehenden Fragestellungen beschäftigen unterschiedlichste Disziplinen wie Medizin, Soziologie, Politik-, Wirtschafts- oder Technikwissenschaften und führen zu einer entsprechend großen Anzahl an Perspektiven auf Städte.

Dabei unterscheidet sich die Dynamik dieses weltweiten Phänomens der Verstädterung in unterschiedlichen Regionen der Welt stark voneinander⁹: Während Schätzungen davon ausgehen, dass die Bevölkerung von London pro Woche um durchschnittlich 1 000 Personen wächst, erfährt Dhaka, die Hauptstadt von Bangladesch einen wöchentlichen Bevölkerungszuwachs von 8 400 und Lagos in Nigeria sogar einen Zuwachs von etwa 10 000 Personen. Diese Unterschiede in den Entwicklungen, als auch die unterschiedlichen kulturellen und ökonomischen Kontexte führen dazu, dass sich die Prozesse der Verstädterung weltweit stark voneinander unterscheiden¹⁰. Vor allem in Ländern des sogenannten Globalen Südens¹¹ stehen Städte durch die schnell anwachsende Bevölkerung vor großen Herausforderungen in der Bereitstellung von Strukturen und Infrastrukturen¹².

Die hohen Wachstumsraten, die sich sowohl durch den Zuzug von Bevölkerung vom Land in die Stadt, als auch durch die hohen Geburtenraten in den Städten

⁷ GLAESER, „Cities, Productivity, and Quality of Life“, ([65], 2011)

⁸ KRAAS UND SCHLACKE, *Der Umzug der Menschheit*, ([108], 2016)

⁹ TAUBENBÖCK, „Ohne Limit?“, ([206], 2015)

¹⁰ UNITED NATIONS, *Urbanization and development*, ([222], 2016)

¹¹ In der Literatur wird häufig zwischen dem Globalen Norden und dem Globalen Süden unterschieden. Diese Begriffe werden als Alternative zu dem früher häufig verwendeten Konzept von erster, zweiter und dritter Welt oder der Idee von sogenannten Entwicklungsländern gebraucht [188]. Mit dem Globalen Norden wird hauptsächlich Europa und Nordamerika bezeichnet, während der Globale Süden vor allem Afrika, Asien und Südamerika umfasst.

¹² CHAUVIN U. A., „What is different about urbanization in rich and poor countries?“, ([28], 2017)

ergeben¹³, können vor allem in Städten des Globalen Südens von öffentlicher und administrativer Seite häufig nicht koordiniert werden. Deshalb findet die Unterbringung und die Versorgung mit Infrastrukturen zum großen Teil in informellen und von der lokalen Verwaltung unabhängigen Prozessen statt¹⁴. Der Architekt Dovey und andere¹⁴ bezeichnen dieses informelle Siedeln (engl. *informal settlement*) als den derzeit «*dominanten Modus zur Absorption der Land-zu-Stadt Migration, der Bereitstellung von bezahlbarem Wohnraum für mehr als eine Milliarde Menschen und der Einrichtung einer ersten Infrastruktur in städtischen Räumen.*»

Die in diesem Prozess entstehenden Siedlungsareale, die weltweit etwa ein Achtel der Weltbevölkerung und damit rund eine Milliarde Menschen beherbergen¹⁵, werden aufgrund ihrer ungeplanten und nicht formellen Struktur als *informelle Siedlungen* oder *Slums* bezeichnet¹⁶. Davis¹⁷ geht davon aus, dass weltweit etwa 200 000 dieser Siedlungsareale existieren und es wird angenommen¹⁸, dass sich die Anzahl der in diesen Siedlungen lebenden Bewohner bis zum Jahr 2030 auf zwei Milliarden verdoppeln wird.

In Abbildung 1.1 sind Satellitenaufnahmen einiger dieser Siedlungsareale in Kapstadt (Südafrika), Mumbai (Indien), Rio de Janeiro (Brasilien) und Caracas (Venezuela) dargestellt. In allen vier Fällen ist die im Vergleich zur Umgebung deutlich geringere Größe der einzelnen Gebäude, die erhöhte Gebäudedichte sowie die nahezu nicht identifizierbare Wegeinfrastruktur innerhalb dieser Areale erkennbar. Die durch starke Unterschiede in der Siedlungsmorphologie¹⁹ zwischen formellen und informellen Siedlungen entstehende polare Struktur²⁰ ist ein wesentliches Merkmal der Urbanisierung im Globalen Süden.

Das Auftreten dieser informellen Siedlungsmorphologie korreliert häufig mit

¹³WORLD HEALTH ORGANIZATION, „A billion voices: listening and responding to the health needs of slum dwellers and informal settlers in new urban settings: World Health Organization“, ([234], 2005)

¹⁴DOVEY U. A., „Towards a morphogenesis of informal settlements“, ([38], 2020)

¹⁵UN-HABITAT, *World Cities Report 2020*, ([77], 2020)

¹⁶In dieser Arbeit werden urbane informelle Siedlungen betrachtet. Informelle Siedlungen in ländlichen (ruralen) Räumen werden nicht untersucht.

¹⁷DAVIS, *Planet of slums*, ([35], 2006)

¹⁸KRAAS UND SCHLACKE, *Der Umzug der Menschheit*, ([108], 2016)

¹⁹Der Begriff *Morphologie* beschreibt die Lehre von der Struktur und Form und bezieht sich hier auf die physische Beschaffenheit der Siedlungen.

²⁰HOERNING, *Megastädte zwischen Begriff und Wirklichkeit - Über Raum, Planung und Alltag in großen Städten*, ([88], 2016)



Abbildung 1.1 – Darstellungen informeller Siedlungen in (i) Kapstadt, Südafrika, (ii) Mumbai, Indien, (iii) Rio de Janeiro, Brasilien und (iv) Caracas, Venezuela. Die Darstellungen stammen aus Google Maps und wurden am 06. Januar 2021 abgerufen.

urbaner Armut^{21,22}. Die damit verbundenen medizinischen, infrastrukturellen und ökonomischen Benachteiligungen haben für deren Bewohner signifikante gesundheitliche Folgen, sowohl physischer, als auch psychischer Art²³. Diese Gefahren, verbunden mit der weltweit enorm großen Anzahl an Bewohnern dieser Siedlungen, haben sie in den Fokus politischer Kampagnen (Ziele für Globale Nachhaltigkeit)²⁴ und der Forschung unterschiedlicher Wissenschaftsdisziplinen gerückt, die eine jeweils eigene Perspektive darauf einnehmen.

²¹UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME, *The challenge of slums: global report on human settlements, 2003*, ([224], 2003)

²²WURM UND TAUBENBÖCK, „Detecting social groups from space – Assessment of remote sensing-based mapped morphological slums using income data“, ([237], 2018)

²³EZEH U. A., „The history, geography, and sociology of slums and the health problems of people who live in slums“, ([46], 2017)

²⁴<https://sdgs.un.org/goals> Abgerufen am 18. Januar 2021.

Dabei ist auffällig, dass diese informellen Siedlungsareale bisher fast ausschließlich aus geographischer²⁵, medizinischer²⁶, historischer²⁷, raumplanerischer bzw. stadtsoziologischer²⁸ oder ökonomischer Perspektive²⁹ betrachtet werden. Obwohl die Frage nach informell gestalteten Gebäudestrukturen und Versorgungsinfrastrukturen für diese Siedlungen vielfältige Verbindungen zu technikwissenschaftlichen Kernthemen aufweisen³⁰, sind spezielle ingenieur- bzw. technikwissenschaftliche Untersuchungen zu informellen Siedlungen in der einschlägigen Literatur bisher nicht vorhanden.

Was kann unter einer technikwissenschaftlichen Sicht verstanden werden? Die deutsche Akademie der Technikwissenschaften³¹ definiert ihre Aufgabe wie folgt: «*Technikwissenschaften legen kognitive Voraussetzungen für Innovation in der Technik und Anwendung technischen Wissens und schaffen die Grundlagen für die Reflexion ihrer Implikationen und Folgen*». Weiterhin besteht das «*Ziel der Technikwissenschaften in der Erzeugung von Struktur- und Regelwissen über Technik - in der Absicht, dieses in technischen Anwendungen zu nutzen.*»³¹

Wird das oben beschriebene Phänomen des informellen Siedelns aus dieser technikwissenschaftlichen Perspektive betrachtet, stellt sich die Frage, wie Infrastrukturen für die entstehenden Siedlungsareale bereitgestellt werden können. Bevor allerdings konkrete technische Innovationen entwickelt werden können, muss, um auf das oben genannte Zitat zurückzugreifen, *Struktur- und Regelwissen* über diese Siedlungen vorhanden sein.

Unter *Strukturwissen* wird in dieser Arbeit die Frage nach der Skala oder Größe der zu versorgenden informellen Siedlungsareale verstanden. Mit *Regelwissen* über informelle Siedlungen ist die Frage nach Modellen verbunden, welche die Mechanismen ihrer Entstehung abbilden. Beide Arten von Wissen dienen zur Konzeption und Innovation von Versorgungsinfrastrukturen dieser Gebiete.

²⁵TAUBENBÖCK, KRAFF UND WURM, „The morphology of the Arrival City - A global categorization based on literature surveys and remotely sensed data“, ([208], 2018)

²⁶EZEH U. A., „The history, geography, and sociology of slums and the health problems of people who live in slums“, ([46], 2017)

²⁷MAYNE, *Slums*, ([134], 2017)

²⁸ROY, „Slumdog Cities“, ([183], 2011)

²⁹MARX, STOKER UND SURI, „The Economics of Slums in the Developing World“, ([132], 2013)

³⁰Sowohl an der Planung und Realisierung von urbanen Strukturen, wie Gebäuden, als auch von Infrastrukturen für Wasser, Energie, Kommunikation oder Transport sind Ingenieure und Ingenieurinnen maßgeblich beteiligt. «*Ingenieure gestalten den Lebensraum der Menschen und ergänzen deren natürliche Fähigkeiten durch Geräte.*» [106]

³¹ACATECH, *Technikwissenschaften: Erkennen - Gestalten - Verantworten*, ([1], 2013)

Skalen informeller Siedlungen

Wie groß sind die Skalen urbaner Systeme und im Speziellen von urbanen informellen Siedlungen? Allgemeiner formuliert, führt dies zur häufig^{32,33,34} gestellten Frage: In welchen Skalen lebt der Mensch?

Die Kenntnis dieser Skalen hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Konzeption technischer Systeme zur Versorgung von Menschen, was am folgenden Beispiel deutlich wird: Systeme zur Wasserversorgung in Städten können in zentrale, dezentrale oder semi-zentrale Konzepte eingeteilt werden³⁵. Während zentrale Konzepte ein gemeinsames Rohrnetz zur Versorgung aller Bewohner nutzen, findet die dezentrale Versorgung informeller Siedlungen beispielsweise durch lokale Pumpen oder Wasser kiosks statt. Semi-zentrale Konzepte^{36,37} wiederum stellen für neu entstehende Stadtteile ein integriertes Wasserver- und Abwasserentsorgungssystem bereit. Die Versorgung ist dabei ähnlich wie in zentralen Konzepten, beschränkt sich aber auf kleine Areale innerhalb einer Stadt. In den bisherigen Betrachtungen^{36,37} bleibt allerdings unklar, ab welcher Siedlungsgröße semi-zentrale Konzepte zur Versorgung geeignet sind. Die Größe des zu versorgenden Gebietes erscheint willkürlich, da die Systemkonzeption durch von außen vorgegebene Faktoren und nicht von denen in städtischen Systemen vorhandenen Größenskalen abhängt³⁷.

Gerade für die Planung oder Erweiterung von Infrastrukturen in informellen Siedlungen erscheint ein gegenläufiger Ansatz sinnvoller, bei der die tatsächlich vorhandenen Skalen informeller Siedlungen als Eingangsparameter in die Konzeption technischer Systeme eingehen³⁸.

Auch wenn die Frage nach urbanen Skalen häufig gestellt wird, sind die meisten der derzeit vorhandenen Untersuchungen auf inter-urbane³⁹ Vergleiche begrenzt, da administrative Statistiken, wie beispielsweise Einwohnerzahlen,

³²BATTY, „The Size, Scale, and Shape of Cities“, ([10], 2008)

³³BATTY, „A Theory of City Size“, ([9], 2013)

³⁴BETTENCOURT, „The Origins of Scaling in Cities“, ([15], 2013)

³⁵SCHRAMM UND FELMEDEN, „Towards more resilient water infrastructures“, ([190], 2012)

³⁶BIEKER, CORNEL UND WAGNER, „Semicentralised supply and treatment systems“, ([17], 2010)

³⁷TOLKSDORF, LU UND CORNEL, „First implementation of a SEMIZENTRAL resource recovery center“, ([215], 2016)

³⁸HACHMANN, JOKAR ARSANJANI UND VAZ, „Spatial data for slum upgrading“, ([78], 2018)

³⁹Vergleich von Städten innerhalb einer Region.

häufig nur auf Stadtebene vorhanden sind⁴⁰. Intra-urbane Statistiken, also die Verteilung von informellen Siedlungsarealen und ihrer Bewohnern innerhalb einer Stadt sind rar und falls vorhanden nicht global vergleichbar, da beispielsweise keine einheitliche Erfassungsmethodik verwendet wird⁴¹. In unterschiedlichen Arbeiten wird deshalb immer wieder darauf hingewiesen, dass das Wissen über diese urbanen informellen Siedlungen stark begrenzt ist⁴². Sowohl die Anzahl der Siedlungen, ihre Größe, als auch ihre räumliche Anordnung ist häufig nicht bekannt.

In der vorliegenden Arbeit werden deshalb in einer global vergleichenden Analyse intra-urbaner Skalen zwei räumliche Größen untersucht, die zentrale Maßzahlen zur Planung von Infrastrukturen darstellen: die Grundflächen der informellen Siedlungen, sowie deren räumlicher Abstand voneinander.

Modelltheoretische Überlegungen anhand informeller Siedlungen

In der Stadtwissenschaft sind unterschiedliche Ansätze zur Beschreibung der Entwicklung urbaner Strukturen bekannt. Diese wurden in den letzten Jahrzehnten immer komplexer, da eine immer größer werdende Anzahl von Parametern in der Modellierung berücksichtigt wurde⁴³. Auch in der Modellierung der Entwicklung informeller Siedlungen^{44,45,46} ist dieser Trend zu beobachten, bei dem sich die Modellierung meist stark auf lokale Spezifika der zu untersuchenden Stadt fokussiert, wodurch die Übertragbarkeit der

⁴⁰Erste Arbeiten zur Untersuchung von städtischen Skalen stammen von Felix Auerbach [6] der einen Zusammenhang zwischen Bevölkerungsanzahl einer Stadt und der Häufigkeit ihres Auftretens identifizierte. Dieser Zusammenhang wurde von Zipf [241] detaillierter ausgearbeitet und ist nun als Zipfsches Gesetz bekannt. Er besagt, dass die Größenverteilung von Städten in einem Land oder einer Region skalenfrei sei und durch ein Potenzgesetz beschrieben werden könne. Dieses Ergebnis wurde in den letzten Jahren detailliert überprüft [146]. Weiterhin kann gezeigt werden, dass sich die Größenverteilung von Städten innerhalb von Ländern eher durch logarithmische Normalverteilungen beschreiben lassen [70].

⁴¹KUFFER U. A., „Spatial patterns of slums: Comparing African and Asian cities“, ([116], 2017)

⁴²TAUBENBÖCK UND WURM, „Ich weiß, dass ich nichts weiß – Bevölkerungsschätzung in der Megacity Mumbai“, ([210], 2015)

⁴³PORTUGALI, *Complexity, cognition and the city*, ([159], 2011)

⁴⁴ROY U. A., „The emergence of slums: A contemporary view on simulation models“, ([185], 2014)

⁴⁵ROY UND LEES, „Understanding resilience in slums using an agent-based model“, ([184], 2020)

⁴⁶BADMOS U. A., „Simulating slum growth in Lagos“, ([7], 2019)

Ansätze auf andere Städte verloren geht. Dieser auch in sozialwissenschaftlichen Arbeiten beobachtete Trend hin zu immer nuancierteren Modellen wird allerdings stark kritisiert⁴⁷.

Dagegen wurden im 20. Jahrhundert zur Untersuchung verschiedener Forschungsfragen aus unterschiedlichen Disziplinen, wie der Strukturbildung in der Biologie⁴⁸, der Friedens- und Konfliktforschung⁴⁹ oder der räumlichen Ökonomie⁵⁰ sehr erfolgreich relativ einfache mathematische Modelle entwickelt, um grundlegende Mechanismen hinter komplexen Prozessen abzubilden. May⁵¹ beschreibt *einfache* Modelle dadurch, dass in ihnen die Eigenschaften eines Systems durch Differentialgleichungen beschrieben und durch lineare Stabilitätsanalysen untersucht werden können. Die drei oben genannten Beispiele^{48,49,50} erfüllen diese Bedingung an *Einfachheit*.

Von den genannten Arbeiten und der Tatsache inspiriert, dass diese Art von *einfachen* Modellen das Zentrum vieler technikkwissenschaftlicher Arbeiten darstellt⁵², soll ein mathematisches Modell entwickelt werden, um die Entstehung informeller Siedlungen zu beschreiben und die hinter der Entstehung dieser Strukturen liegenden Mechanismen zu identifizieren.

Wie kann ein solches Modell entwickelt werden? Vor der Einführung der Forschungsfragen dieser Arbeit, werden zwei Konzepte der Modellbildung vorgestellt. Pelz⁵³ beschreibt den Prozess der Modellbildung folgendermaßen (Abbildung 1.2, (i)). Im Rahmen einer Analyse werden, ausgehend von der Messung eines bestimmten Aspektes der Wirklichkeit, Informationen zusammengetragen. In Kombination mit bereits vorhandenem Wissen oder Anregungen aus anderen Forschungskontexten, wird daraufhin in der *Induktion* eine Idee oder Theorie zur Erklärung des beobachteten Phänomens entwickelt. In einem gegenläufigen Vorgehen kann durch Synthese auf Basis von Intuition eine Theorie entwickelt werden, die in der *Deduktion* ausgearbeitet wird, um darauf aufbauend Vorhersagen über das Verhalten der realen Welt zu treffen. Im besten Fall kann die aus der Theorie gewonnene Erkenntnis in praktischen Anwendungen in der technoökonomischen Welt genutzt werden. Pelz⁵³ stellt heraus, dass in der Modellbildung eine eindeutige Zuordnung zu aufwärts- oder abwärtsgerichtetem Vorgehen häufig nicht möglich und Modellbildung meist eine Kombination von Induktion und Deduktion

⁴⁷HEALY, „Fuck Nuance“, ([82], 2017)

⁴⁸TURING, „The Chemical Basis of Morphogenesis“, ([220], 1952)

⁴⁹RICHARDSON, „Mathematical Psychology of War“, ([178], 1935)

⁵⁰KRUGMAN, *The self-organizing economy*, ([114], 1996)

⁵¹MAY, „Simple mathematical models with very complicated dynamics“, ([133], 1976)

⁵²ACATECH, *Technikwissenschaften: Erkennen - Gestalten - Verantworten*, ([1], 2013)

⁵³PELZ U. A., *Mastering Uncertainty in Mechanical Engineering*, ([156], 2021)

beziehungsweise Analyse und Synthese ist.

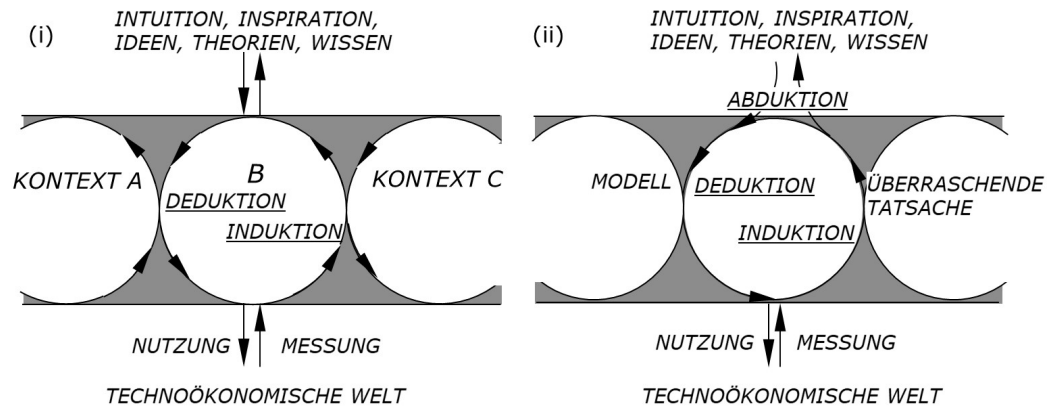


Abbildung 1.2 – (i) Prozess der Modellbildung nach Pelz [156] und (ii) inferentielle Triade nach Peirce [141].

Diese Vorstellung der Modellbildung wird im Rahmen dieser Arbeit aufgegriffen und erweitert. In der Untersuchung von Modellen wird häufig auf die beiden Konzepte der *Deduktion* und der *Induktion* verwiesen. Dabei bleibt meist ungeklärt, woher die Forschenden die Idee für ein Modell erhalten und welche Konzepte oder welches Vorwissen sie zu einer bestimmten Hypothese führen.

Diesen Umstand untersuchte am Ende des 19. Jahrhunderts Charles S. Peirce. Er postuliert, dass Wissenserkenntnis folgende Stufen durchläuft⁵⁴, die in Abbildung 1.2, (ii) dargestellt sind: Zunächst wird, häufig ausgehend von einer überraschenden Tatsache, in einer *Abduktion*⁵⁵ eine These zur Beschreibung eines Systems oder dessen zeitlichen Verhaltens aufgestellt. Dies ist beispielsweise ein mathematisches Modell, das die zeitliche Entwicklung eines Systems unter Verwendung der Anfangs- und Randbedingungen beschreibt. Die Idee für ein solches Modell beruht beispielsweise auf der kreativen Idee eines Forschenden, die wiederum das Resultat unterschiedlicher Erfahrungen und Vorkenntnisse dieser Person oder Personengruppe ist. Kreativität ist damit Teil des Forschungs- und Lernprozesses⁵⁶. Die im Rahmen der Abduktion entwickelte Hypothese wird in einem zweiten Schritt, der *Deduktion*, ausgearbeitet, um Vorhersagen und Konsequenzen dieser These zu ermitteln. In einem letzten Schritt, der *Induktion*, wird anhand empirischer Untersu-

⁵⁴Anregung zu diesem Gedanken kommt von Precht [160].

⁵⁵*Abduktion* bedeutet wörtlich soviel wie Wegführung. In der Abduktion löst sich der Forschende von Bekanntem und stellt neue Hypothesen auf. [141]

⁵⁶MINNAMEIER UND SCHNEBEL, „Die Kreativität des Pragmatismus: Charles Sanders Peirce in der Serie „Philosophie für Manager“, ([141], 2014)

chungen die in der Abduktion aufgestellte These verifiziert oder falsifiziert⁵⁷. Während der in Abbildung 1.2, (i) beschriebene Prozess die Ideen vor allem als Eingangsgröße in die Modellbildung versteht, wird im Konzept nach Peirce (ii) das kreative Moment des Forschens, in dem einerseits auf Intuition, andererseits auf Vorwissen und Erkenntnissen aus anderen Forschungsdomänen zurückgegriffen wird, stärker betont und in den Prozess der Modellbildung integriert.

1.1 Forschungsfragen

Zusammengefasst führen die oben dargelegten Ausführungen zu folgenden Forschungsfragen:

- (i) Wie kann die Entstehung urbaner informeller Siedlungen mit einem einfachen mathematischen Modell beschrieben werden?
- (ii) Welche Schlussfolgerungen und welcher Erkenntnisgewinn können aus einem solchen Modell gezogen werden?
- (iii) Welche Skalen informeller Siedlungen können in Städten des globalen Südens identifiziert werden und inwieweit entsprechen sie dem Modell?
- (iv) Wie können sowohl die empirischen, als auch die methodischen Erkenntnisse einer solchen technikwissenschaftlichen Sichtweise genutzt werden?

Diese Abfolge aus *Abduktion*, *Deduktion* und *Induktion* (Abbildung 1.2), die in den drei ersten Forschungsfragen aufgegriffen wird, dient im Folgenden als Gerüst dieser Arbeit. Zur Beantwortung der vierten Forschungsfrage wird in der *Reflektion* in einem letzten Schritt das Vorgehen in dieser Arbeit anhand der getroffenen erkenntnistheoretischen Annahmen diskutiert.

1.2 Aufbau der Arbeit

Ausgehend von den oben beschriebenen Forschungsfragen ist die weitere Arbeit folgendermaßen gegliedert: Zunächst wird in Kapitel 2 die Literatur, die sich mit urbanen informellen Siedlungen auseinandersetzt, zusammengefasst und mit Blick auf die Fragestellungen ausgewertet. Dabei werden insbesondere gängige Beschreibungen informeller Siedlungen und deren Definitionen betrachtet.

⁵⁷Formuliert wird dieser Gedanke in den *Collected Papers of Charles Sanders Peirce* 5.171 [81]

Weiterhin werden mögliche Methoden der Erfassung dieser Siedlungsart beschrieben und aktuelle Modelle und Modellansätze zusammengefasst, die die Entwicklung informeller städtischer Strukturen abbilden.

Auf dieser Basis werden am Ende des zweiten Kapitels in der *Abduktion* die Grundzüge des zu entwickelnden Modells vorgestellt. Diese bauen einerseits auf aktuellen Entwicklungen in der Forschung zu urbanen Systemen und andererseits auf Grundzügen der Forschung zu sogenannten offenen Systemen auf.

Daraufhin werden in Kapitel 3 grundlegende Arbeiten zu der verwendeten Modellart und ähnliche Anwendungen vorgestellt. Im Anschluss wird ein einfaches mathematisches Modell entwickelt und dessen Implikationen mithilfe einer linearen Stabilitätsanalyse untersucht, welche den Kern der *Deduktion* darstellt. Im Gegensatz zu häufig lokal spezifischen Modellen ist das Ziel dieser Arbeit die Entwicklung eines möglichst generischen, global anwendbaren Modells, das die Entstehung informeller Siedlungen abbildet.

In Kapitel 4 werden in der *Induktion* auf Basis von empirischen Siedlungsdaten aus unterschiedlichen Regionen des Globalen Südens die Skalen dieser informellen Siedlungen ermittelt. Dafür werden zunächst die verwendeten Daten und Methoden vorgestellt, sowie die tatsächliche Siedlungsverteilung von informellen Stadtstrukturen untersucht. Dabei werden in der Stadtgeographie entwickelte Methoden und Ergebnisse aus einer technikwissenschaftlichen Perspektive betrachtet.

In der Diskussion in Kapitel 5 wird das entwickelte Modell mit den empirischen Ergebnissen verglichen. Weiterhin wird das Modell bewertet und die dabei eingenommene erkenntnistheoretische Perspektive *reflektiert*. Zuletzt werden mögliche Anwendungen der Ergebnisse vorgestellt.

Das dabei entwickelte Modell^{58,59}, die Analysen geographischer^{60,61,62,63,64,65,66}, ökonomischer und demographischer⁶⁷ Daten, sowie die Anwendungen der Methoden in unterschiedlichen Disziplinen^{68,69,70,71,72,73} führten zu acht Journal Veröffentlichungen und acht Konferenzbeiträgen. In zwei weiteren bisher nicht begutachteten Beiträgen wird das Modell diskutiert⁷⁴ und eine alternative Modellanwendung⁷⁵ vorgeschlagen. Die genannten Veröffentlichungen bilden die Grundlage der Arbeit und werden durch die parallel entstandenen studentischen Abschlussarbeiten ergänzt⁷⁶.

⁵⁸PELZ, FRIESEN UND HARTIG, „Similar size of slums caused by a Turing instability of migration behavior“, ([157], 2019)

⁵⁹FRIESEN, TESSMANN UND PELZ, „Reaction-diffusion Model Describing the Morphogenesis of Urban Systems in the US“, ([58], 2019)

⁶⁰FRIESEN U. A., „The similar size of slums“, ([57], 2018)

⁶¹FRIESEN U. A., „Size distributions of slums across the globe using different data and classification methods“, ([56], 2019)

⁶²FRIESEN U. A., „Sensitivity of slum size distributions as a function of spatial parameters for slum classification“, ([51], 2019)

⁶³FRIESEN U. A., „Size Distributions for Morphological Slums in Asia and South America“, ([52], 2019)

⁶⁴TIESSEN U. A., „Using remote sensing data and cluster algorithms to structure cities“, ([214], 2019)

⁶⁵HARTIG, FRIESEN UND PELZ, „Spatial relations of slums“, ([80], 2019)

⁶⁶HENN U. A., „Spatial Analysis of Settlement Structures to Identify Pattern Formation Mechanisms in Inter-Urban Systems“, ([85], 2020)

⁶⁷FRIESEN U. A., „Determining Factors for Slum Growth with Predictive Data Mining Methods“, ([54], 2018)

⁶⁸FRIESEN, RAUSCH UND PELZ, „Providing water for the poor - towards optimal water supply infrastructures for informal settlements by using remote sensing data“, ([55], 2017)

⁶⁹RAUSCH U. A., „A Holistic Concept to Design Optimal Water Supply Infrastructures for Informal Settlements Using Remote Sensing Data“, ([173], 2018)

⁷⁰RAUSCH U. A., „Using Mixed-Integer Programming for the Optimal Design of Water Supply Networks for Slums“, ([174], 2018)

⁷¹MECK U. A., „Designing a water supply network for slums in Rio de Janeiro using Mixed Integer Programming“, ([137], 2019)

⁷²FRIESEN U. A., „Slums, Space, and State of Health—A Link between Settlement Morphology and Health Data“, ([48], 2020)

⁷³FRIESEN UND PELZ, „COVID-19 and Slums“, ([53], 2020)

⁷⁴FRIESEN, HARTIG UND PELZ, „Revisiting the Mechanism Behind the Similar Size of Slums“, ([50], 2020)

⁷⁵FRIESEN U. A., „Diffusion-driven demographics – Turing model as a concept for the emergence of sedentism“, ([49], 2020)

⁷⁶Abschlussarbeiten von Jakob Hartig [79], Katharina Henn [84] und Bartosz Prokop [165].

Kapitel 2

Grundlagen zu informellen Siedlungen

*... denn dies sind, sozusagen, Vorstädte unserer Sprache.
(Und mit wieviel Häusern, oder Strassen, fängt eine Stadt an, Stadt zu sein?)
Unsere Sprache kann man ansehen als eine alte Stadt:
Ein Gewinkel von Gässchen und Plätzen, alten und neuen Häusern...*

Ludwig Wittgenstein¹

Um sich urbanen informellen Siedlungsarealen und ihrer infrastrukturellen Versorgung und damit dem Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit zu nähern, wird folgender Weg eingeschlagen: Nach einem Überblick über Perspektiven auf, und Definitionen von Städten (Abschnitt 2.1), wird die Polarität urbaner Räume (Abschnitt 2.2) und ihre Ausprägung in informellen Siedlungen betrachtet. Nachdem gängige Bezeichnungen dieser Areale geschichtlich eingeordnet, ihre jeweils kontextuelle Erwähnung beschrieben und die Eigenschaften informeller Siedlungsstrukturen zusammengefasst (Abschnitt 2.3) worden sind, wird der Fokus auf die Frage nach Infrastrukturen in diesen Siedlungsarealen gelegt (Abschnitt 2.4). Darauf aufbauend (Abschnitt 2.5) werden mögliche Methoden zur Erfassung dieser Siedlungen und zuletzt computerbasierte Modelle vorgestellt, die die zeitliche und räumliche Entwicklung dieser Areale beschreiben. In einem letzten Schritt wird das in diesem Kapitel zusammengefasste Wissen genutzt, um in Abschnitt 2.6 eine erste Skizze des zu entwickelnden einfachen Modells zu zeichnen.

¹ 1889-1951, Österreichischer Ingenieur, Mathematiker und Philosoph. Zitat aus: *Philosophische Untersuchungen*, 1953.

2.1 Stadtdefinitionen

Den Vereinten Nationen² zufolge lebten im Jahr 2018 etwa 4.2 Milliarden Menschen³ in urbanen⁴ Räumen. Die Bezeichnung *urbaner Raum* ist in der Literatur häufig als Synonym für *Stadt* anzutreffen. Auch in dieser Arbeit werden beide Begriffe, falls nicht explizit anders bezeichnet, synonym verwendet. In der oben genannten Schätzung der Vereinten Nationen wird die Bezeichnung *urbaner Raum* als Sammelbegriff für *nicht-ländliche* (nicht-rurale) Siedlungsgebiete verstanden. Die Notwendigkeit der Verwendung eines solchen Sammelbegriffs resultiert aus den fehlenden international anerkannten Kriterien für eine einheitliche Definition von Städten. Vielmehr wird in globalen Statistiken, wie den *World Urbanization Prospects* der Vereinten Nationen⁵, auf nationale Definitionen von Städten oder urbanen Räumen zurückgegriffen. Diese unterscheiden sich zum Teil erheblich voneinander, wie die folgenden Beispiele⁶ zeigen:

Während in Island oder Dänemark Orte mit mindestens 200 Einwohnern als urbane Räume definiert werden, sind es in Deutschland Kommunen mit mindestens 150 Einwohnern pro km². In Ghana oder Indien werden Gebiete als *urban* definiert, wenn sie mindestens 5000 Einwohner haben. Allerdings ist in Indien zur Erfüllung der Definition zusätzlich eine Bevölkerungsdichte von mindestens 400 Einwohnern pro km², sowie ein Anteil von mindestens 75% der männlichen arbeitenden Bevölkerung, die in nicht-landwirtschaftlichen Beschäftigungsverhältnissen steht, nötig.

Die historisch gewachsene lokale Definition einer Stadt, die kulturell geprägt und in administrativen Beschreibungen festgehalten ist, hängt somit stark von deren jeweiligem Kontext ab.

Dieses sehr quantitative Verständnis von Städten, das sich häufig vor allem auf die Anzahl der Personen bezieht, bildet allerdings nur einen einzelnen Aspekt dieser Siedlungsgebiete ab⁷. Wie bereits in den vorangegangenen Definitionen sichtbar wird, ist neben der hohen Anzahl an Personen die hohe Bevölkerungsdichte ein weiteres Merkmal von Städten, also die Anzahl von Personen innerhalb eines bestimmten Raumes.

² UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS UND POPULATION DIVISION, *World urbanization prospects*, ([223], 2019)

³ Das entspricht einem Anteil von 55% der Gesamtbevölkerung.

⁴ Die Bezeichnung *urban* leitet sich von dem lateinischen Begriff *urbanus* ab, der wiederum *Stadtbewohner*, *Städter* oder *Römer* bedeutet.

⁵ UNITED NATIONS, *Urbanization and development*, ([222], 2016)

⁶ Die folgenden nationalen Definitionen sind im Anhang der *World Urbanization Prospects* [223] aufgeführt.

⁷ WIRTH, „Urbanism as a Way of Life“, ([232], 1938)

Die aus einer hohen Bevölkerungsdichte resultierende räumliche Nähe zwischen Personen wird immer wieder als einer der Gründe für die erhöhte Produktivität in Städten angeführt^{8,9}, die wiederum mit dem hohen Wirtschaftswachstum dieser Gebiete korreliert. Gleichzeitig birgt diese hohe Dichte auch Risiken für urbane Räume. So ist die Gefahr erhöhter Kriminalität oder einer leichteren Verbreitung von Infektionskrankheiten⁹ hier höher, als in ruralen Räumen. Vor allem die Ausbreitung der Corona-Pandemie zeigte dies im Jahr 2020 deutlich¹⁰.

Weiterhin macht - im Gegensatz zu ländlichen Gemeinschaften - die hohe Anzahl und Dichte an Personen in Städten eine nähere Bekanntschaft zu allen Menschen, die einem Individuum im Laufe des Alltags begegnen, nahezu unmöglich. Dies hat einen starken Einfluss auf das soziale Zusammenleben, was in grundlegenden soziologischen Arbeiten^{11,12,13,14} zu Beginn des 20. Jahrhunderts eindrücklich beschrieben wird. Als weiteres wesentliches Merkmal von Städten wird deshalb neben der hohen Anzahl und Dichte, die daraus resultierende *soziale Differenzierung* aufgeführt¹¹.

Diesen demographischen und soziologischen Beschreibungen urbaner Räume, werden in neueren Ansätzen¹⁵ morphologische Definitionen beigelegt. In diesen Ansätzen werden - meist auf Basis von Fernerkundungsdaten, wie zum Beispiel Satellitenaufnahmen - Metriken und Schwellwerte definiert, die kennzeichnen, ob ein Gebiet urban oder rural ist¹⁵. Die Grenzen einer Stadt sind hierbei vor allem durch deren physische Bebauung bzw. deren Form (Morphologie) definiert¹⁶ und hängen damit nur implizit mit der Anzahl der dort lebenden Bevölkerung zusammen. Durch Verwendung dieser physisch messbaren Merkmale ist es möglich, mit einheitlichen Methoden die Ausdehnung und zeitliche Veränderung von Städten zu erfassen und global vergleichende

⁸ GLAESER, „Cities, Productivity, and Quality of Life“, ([65], 2011)

⁹ BRYAN, GLAESER UND TSIVANIDIS, „Cities in the Developing World“, ([23], 2020)

¹⁰ BOUFFANAIS UND LIM, „Cities — try to predict superspreading hotspots for COVID-19“, ([19], 2020)

¹¹ WIRTH, „Urbanism as a Way of Life“, ([232], 1938)

¹² DURKHEIM, *De la division du travail social*, ([40], 1911)

¹³ SIMMEL, *Die Großstädte und das Geistesleben*, ([195], 2014)

¹⁴ WEBER, *Die Stadt*, ([230], 2000)

¹⁵ TAUBENBÖCK U. A., „A new ranking of the world’s largest cities—Do administrative units obscure morphological realities?“, ([204], 2019)

¹⁶ TAUBENBÖCK U. A., „Monitoring urbanization in mega cities from space“, ([203], 2012)

Studien¹⁷ durchzuführen¹⁸.

2.2 Polarität von Städten

Sowohl demographische, morphologische, als auch soziologische Betrachtungsweisen nehmen in ihren Analysen die Heterogenität¹⁹, Fragmentierung²⁰ oder Polarität²¹ urbaner Räume war. Die Bewohner einer Stadt, als auch deren Behausungen, deren physische Wirklichkeit die gesellschaftlichen Verhältnisse reflektiert²², können deshalb unterschiedlichen sozialen Gruppen zugeordnet werden. Eine häufig verwendete Kategorie ist dabei die des Wohlstands. Danach können Stadtbewohner in *arm* und *reich* eingeteilt werden. Bereits Platon²³ erwähnt diese Differenzierung²⁴. Er spricht davon, dass sich jede Stadt in eine *reiche* und eine *arme* Stadt einteilen lässt.

Diese dichotome, vereinfachte Sicht auf das soziale Gefüge einer Stadt und die dabei verwendeten Bezeichnungen *arm* und *reich* werden von unterschiedlichen Autoren^{25,26} zum Teil stark kritisiert, da dadurch die große Bandbreite der Lebenswirklichkeiten unterschiedlicher Personengruppen vernachlässigt wird. Unter Verweis auf die im Folgenden beschriebenen Beobachtungen von Städten mit polarer Struktur, die auch in der Literatur durch das Konzept der Armut beschrieben wird, wird diese dichotome Einteilung im Rahmen dieser Arbeit dennoch weiter verwendet. Sie sollte aber immer wieder kritisch beurteilt werden²⁷.

¹⁷ESCH U. A., „Breaking new ground in mapping human settlements from space – The Global Urban Footprint“, ([45], 2017)

¹⁸SCHMIDT-KALLERT stellt diesen drei Dimensionen der Urbanisierung (demographisch, soziologisch und morphologisch) auch noch die ökonomische Dimension bei [188]. Diese wird im weiteren Verlauf der Arbeit aber nicht vertieft und sei deshalb nur am Rand erwähnt.

¹⁹TAUBENBÖCK U. A., „A new ranking of the world’s largest cities—Do administrative units obscure morphological realities?“, ([204], 2019)

²⁰SCHMIDT-KALLERT, *Magnet Stadt*, ([188], 2017)

²¹HOERNING, *Megastädte zwischen Begriff und Wirklichkeit - Über Raum, Planung und Alltag in großen Städten*, ([88], 2016)

²²TAUBENBÖCK U. A., „Integrating remote sensing and social science“, ([205], 2009)

²³Antiker griechischer Philosoph, 428 - 348 v. Chr.

²⁴PLATO, *Der Staat*, ([158], 2015, Anregung zu diesem Verweis stammt von [209])

²⁵MAYNE, *Shums*, ([134], 2017)

²⁶ROSLING, ROSLING UND RÖNNLUND, *Factfulness*, ([182], 2019)

²⁷Es sei an dieser Stelle auf grundlegende Arbeiten [22, 115] zu epistemischer Gewalt verwiesen, in denen kritisch reflektiert wird, dass soziale und politische Ungleichheiten nicht unabhängig von wissenschaftlichen Analysen existieren, sondern die Sicht der Analysen selbst diese Ungleichheiten zum Teil manifestiert.

Die Verwendung dieser Begriffe und Konzepte geschieht deshalb ausdrücklich in dem Bewusstsein, dass durch Sprache und Zuordnung Macht und teilweise auch Unterdrückung ausgeübt wird. Um diese Spannung im Laufe der weiteren Arbeit wahrzunehmen und sie auch visuell hervorzuheben, werden die Gruppen im Folgenden in kursiver Schreibweise als *Arm* und *Reich* bezeichnet.

Das Konzept der *Armut* bedarf allerdings ebenfalls einer Definition und umfasst unterschiedliche Dimensionen: Baud und andere²⁸ definieren *Armut* als »Benachteiligung bei der Einkommensgenerierung, dem physischen Lebensraum, der Infrastruktur sowie dem Zugang zu staatlich bereitgestellten Ressourcen, politischer Mitsprache und Autonomie«. Eine ähnliche Perspektive ist in der Technikphilosophie²⁹ zu finden, in denen *Armut* als Abwesenheit oder Ausschluss von Innovation und technischen Errungenschaften bezeichnet wird³⁰.

Viele der oben beschriebenen Dimensionen von *Armut* sind, zum Teil in hohem Maße, in den bereits in der Einleitung in Abbildung 1.1 vorgestellten informellen urbanen Strukturen anzutreffen. Lilford und andere³¹ bezeichnen diese Siedlungsstrukturen deshalb auch als Areale mit einer »räumlichen Konzentration an Armut«. Ooi und Phua³² beschreiben die Bildung dieser Areale gar als »Verstädterung von Armut«, die sich in schlechten oder provisorischen Gebäudestrukturen und schlechtem Zugang zu Infrastrukturen zeigt. Weiterhin sind diese Siedlungen häufig in Flussnähe oder an Berghängen zu finden und deren Bewohner damit in besonderer Weise durch Naturkatastrophen gefährdet³³.

Diese Siedlungsareale werden in der englischsprachigen Literatur meist als *slums*, *informal settlements*, *deprived areas*, *shanty towns*, *squatter settlements* oder *sub-standard areas* bezeichnet. Weiterhin werden lokale Termini wie *favela*, *bidonville*, *barrio* oder *badung* verwendet³³. Im deutschen Sprachgebrauch sind sie vor allem als *Armuts-* oder *Elendsviertel* bekannt.

Die zuletzt genannten Begriffe wie *Slum* oder *Armutsviertel* rufen bestimmte Bilder und Assoziationen hervor und erscheinen zunächst eindeutig. Allerdings ist, wie bereits an dem oben erwähnten Beispiel von Stadtdefinitionen deutlich

²⁸BAUD U. A., „Matching deprivation mapping to urban governance in three Indian megacities“, ([12], 2009)

²⁹ACATECH, *Technikwissenschaften: Erkennen - Gestalten - Verantworten*, ([1], 2013)

³⁰Im Kontext dieser Ausführungen muss noch der *Multidimensional Poverty Index* erwähnt werden, der in neuerer Zeit häufig für die Beschreibung von Armut verwendet wird und dabei *Armut* in den Dimensionen Gesundheit, Bildung und Lebensbedingungen misst [3].

³¹LILFORD U. A., „Because space matters“, ([123], 2019)

³²Ooi und PHUA, „Urbanization and Slum Formation“, ([148], 2007)

³³EZEI U. A., „The history, geography, and sociology of slums and the health problems of people who live in slums“, ([46], 2017)

wird, eine eindeutige Definition von *Slum* oder *informellen Siedlungen* schwierig^{34,35}. Vielmehr zeigen unterschiedliche Studien^{34,35}, dass der Übergang von *informellen* zu sogenannten *formellen* oder geplanten Siedlungen fließend ist und stark vom räumlichen, geographischen, kulturellen und ökonomischen Kontext der jeweiligen Siedlungsareale abhängt³⁶.

2.3 Historie, Definition und Eigenschaften informeller Siedlungen

Die Prozesse der Urbanisierung und der damit verbundenen Industrialisierung sind seit deren Beginn im 19. Jahrhundert³⁷ untrennbar mit der Benachteiligung bestimmter Bevölkerungsschichten verbunden^{38,39}.

In diesem Zeitraum wurde begonnen, die sich häufig ähnelnden Siedlungsformen der benachteiligten Bevölkerungsgruppen, die oft durch schlechte hygienische Bedingungen gekennzeichnet waren, explizit als „Slums“ zu bezeichnen⁴⁰. Bekannte Beispiele waren die meist von Arbeitern bewohnten Viertel in den von Industrie geprägten Städten Großbritanniens, wie London, Manchester oder Liverpool³⁹. Hier werden auch die etymologischen Ursprünge dieser Bezeichnung vermutet. Der Begriff *Slum* scheint einerseits mit dem englischen „slump“, das so viel wie nasser Sumpf³⁸ bedeutet, dem deutschen Wort „Schlamm“ oder dem bayerischen „Schlumpen“ in Verbindung zu stehen³⁹. Seit seiner Entstehung ruft dieser Begriff somit Assoziationen zu unhygienischen Lebensbedingungen hervor und ist in weiten Teilen des globalen Nordens negativ konnotiert³⁸.

Um diese negative Konnotation zu vermeiden, wurde die Bezeichnung „Slum“ vor allem in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts immer seltener für die Beschreibung von Gebieten urbaner Armut verwendet³⁹. In den beginnenden 2000er Jahren erlebte diese Bezeichnung allerdings eine Renaissance. Dies hängt stark mit der *Cities without slums*-Initiative (1999) der Cities-Alliance

³⁴LILFORD U. A., „Because space matters“, ([123], 2019)

³⁵THOMSON U. A., „Need for an Integrated Deprived Area “Slum” Mapping System (IDE-AMAPS) in Low- and Middle-Income Countries (LMICs)“, ([212], 2020)

³⁶TAUBENBÖCK, KRAFF UND WURM, „The morphology of the Arrival City - A global categorization based on literature surveys and remotely sensed data“, ([208], 2018)

³⁷BERRY, „Urbanization“, ([14], 2008)

³⁸MAYNE, *Slums*, ([134], 2017)

³⁹GILBERT, „The Return of the Slum“, ([64], 2007)

⁴⁰EZEH U. A., „The history, geography, and sociology of slums and the health problems of people who live in slums“, ([46], 2017)

zusammen.⁴¹ Letztere setzt sich für eine nachhaltige Stadtentwicklung und ein Stadtbild ohne Armutsviertel ein⁴². Von den Vereinten Nationen wurde dieses Ziel in ihren im Jahr 2000 verabschiedeten Millenniums-Entwicklungszielen aufgegriffen und wird auch in den aktuellen Nachhaltigkeitszielen⁴³ der Vereinten Nationen adressiert. In Ziel 11.1 wird angestrebt allen Menschen adäquaten, sicheren und bezahlbaren Wohnraum, sowie Zugang zu Basisinfrastrukturen zur Verfügung zu stellen und somit alle *Slums* aufzuwerten⁴⁴. Verbunden mit dieser in einem globalen Rahmen gesteigerten Sichtbarkeit des Begriffs, wurde der damit beschriebenen Siedlungsform und der Lebenswirklichkeit ihrer Einwohner in den ersten beiden Jahrzehnten des 21. Jahrhunderts auf unterschiedlichen Ebenen mehr Aufmerksamkeit geschenkt. Neben diversen politischen Förderprogrammen, Projekten der Weltbank und der Erwähnung in der Popkultur⁴⁵ zeigt sich diese Entwicklung vor allem in der Betrachtung wissenschaftlicher Publikationen. In Abbildung 2.1 ist die zeitliche Entwicklung der Anzahl der Publikationen, die sich mit dieser Siedlungsart auseinandersetzen, für untersuchte Länder in Afrika, Südasien und Südamerika aufgetragen. Es ist deutlich zu sehen, dass sowohl die oben erwähnte Initiative der *Cities without slums*, als auch die Verabschiedung der Millenniumsziele mit einem rasanten Anstieg der Forschung zu *Slums* korrelieren. Seither erscheinen regelmäßig Statistiken, die aufzeigen, dass ein großer Teil der Weltbevölkerung in *Slums* lebt. Die Vereinten Nationen⁴⁶ gehen für das Jahr 2018 von weltweit etwa 1.03 Milliarden Bewohnern dieser Siedlungen aus. Die Weltbank schätzt diese Zahl für das Jahr 2018 auf über 1.2 Milliarden

⁴¹Die zitierte Initiative *Cities without slums* wird seit deren Beginn von unterschiedlichen Seiten immer wieder stark kritisiert [64, 183, 134]. Die Namenswahl der Initiative, die Städte ohne *Slums* anstrebt, suggeriere implizit, dass die Lebenswirklichkeit einer großen Bevölkerungsgruppe (der Bewohner dieser informellen Siedlungsareale) in den Städten nicht erwünscht sei.

⁴²GILBERT, „The Return of the Slum“, ([64], 2007)

⁴³engl. *Sustainable Development Goals*. <https://sdgs.un.org/goals> Abgerufen am 18. Januar 2021.

⁴⁴engl. *slum upgrading*

⁴⁵Fernando Meirelles Film *City of God* aus dem Jahr 2002 thematisiert die gleichnamige Favela in Rio de Janeiro und wurde für vier Oscars nominiert. Danny Boyles *Slumdog Millionär* war im Jahr 2009 der erfolgreichste Film bei den Oscars und wurde mit acht Auszeichnungen prämiert. Zuletzt gewann 2020 *Parasite* von Bong Joon-Ho, der städtische Armut in Südkorea thematisiert, als erster nicht englischsprachiger Film den Preis des besten Films und drei weitere Oscars. Die Rezeption urbaner Armut in der Popkultur wird von Roy ausführlich analysiert [183].

⁴⁶UN-HABITAT, *World Cities Report 2020*, ([77], 2020)

Menschen⁴⁷.

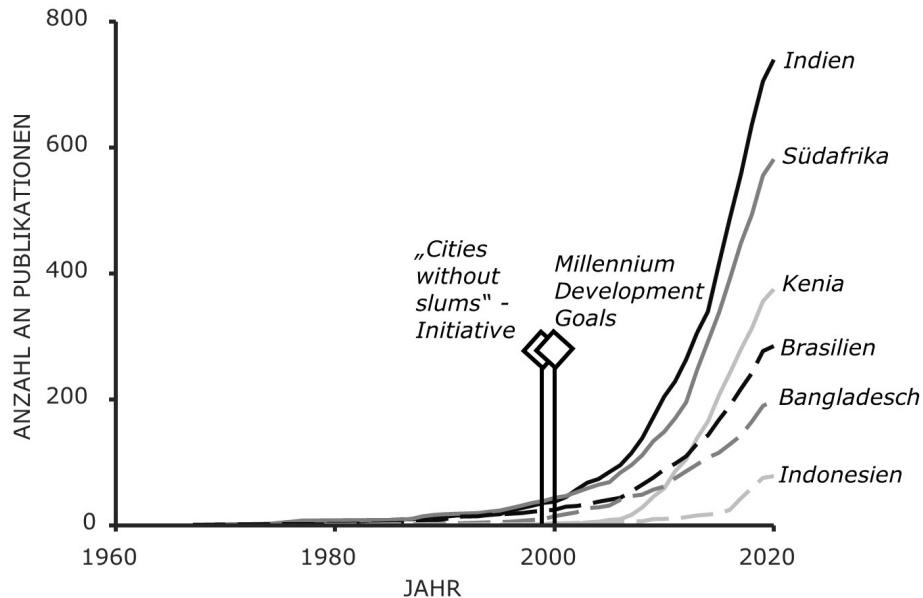


Abbildung 2.1 – Dargestellt ist die zeitliche Entwicklung wissenschaftlicher Publikationen, in denen mindestens einer der oben genannten Begriffe für informelle Siedlungen erwähnt wird.

Nachdem die Begriffe *Slum* und *informelle Siedlung* mehrfach verwendet wurden und auch in den oben genannten Statistiken zitiert werden, stellt sich die Frage nach deren konkreter Definition. Die Vereinten Nationen⁴⁸ bezeichnen einen Ort, ein Stadtviertel oder eine ganze Stadt als *Slum*, wenn mindestens eines der folgenden fünf Kriterien nicht erfüllt ist:

- (i) Langlebige, dauerhafte Unterkünfte, die vor extremen klimatischen Bedingungen schützen,
- (ii) ausreichender Wohnraum, d.h. nicht mehr als drei Personen, die sich ein Zimmer teilen,
- (iii) leichter Zugang zu sauberem Wasser in ausreichender Menge zu einem erschwinglichen Preis,

⁴⁷Diese Anzahl resultiert aus den World Development Indicators: <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>, abgerufen am 6. Januar 2021.

⁴⁸UN-HABITAT, *The millennium development goals and urban sustainability*, ([76], 2007)

- (iv) Zugang zu angemessenen sanitären Einrichtungen in Form einer privaten oder öffentlichen Toilette, die von einer angemessenen Anzahl von Menschen gemeinsam benutzt wird oder
- (v) Sicherheit der Besitzverhältnisse, die eine Zwangsräumung verhindert.

Eine weitere Bezeichnung, die neben *Slum* häufig für informell gebildete Siedlungsareale verwendet wird, ist die der *informellen Siedlung*.

Informelle Siedlungen werden im Habitat III der Vereinten Nationen⁴⁹ folgendermaßen definiert: eine illegale Landnahme ohne sichere Besitzverhältnisse, eine von städtischer Basisinfrastruktur ausgeschlossene Umgebung und eine Planung, die nicht mit lokalen Regularien abgestimmt ist. In dieser Definition werden Slums explizit als Unterkategorie informeller Siedlungen bezeichnet. Trotz dieser theoretischen Differenzierung, werden die Bezeichnungen *informelle Siedlung* und *Slum* in der Literatur^{50,51} häufig synonym verwendet. In dieser Arbeit wird ebenfalls vor allem auf den Begriff der *informellen Siedlung* zurückgegriffen⁵².

Medizinische, sowie soziologische Analysen^{53,54} weisen auf den qualitativen Charakter der beiden aufgeführten Definitionen hin. Quantitative Aussagen beispielsweise zur Größe, des in (ii) erwähnten Zimmers, werden in der Definition nicht aufgeführt. Auch wird die „angemessene Anzahl von Menschen“, (iv) die sich eine sanitäre Einrichtung teilen oder die „ausreichende Menge sauberen Wassers“ sowie der dafür „erschwingliche Preis“ nicht näher definiert. Ähnlich, wie bei der Erhebung der städtischen Bevölkerung, greifen die von den Vereinten Nationen erhobenen Statistiken auf nationale Daten und Definitionen zurück. Diese wiederum verwenden unterschiedliche Kriterien in der Erfassung von Slums. Während im indischen Zensus von 2011 Gebiete als informelle Siedlung klassifiziert werden, in denen mindestens 300 Personen oder 60-70 Haushalte keine angemessenen Hygienebedingungen haben, so liegt die untere Gebäudeanzahl bei der brasilianischen Statistikbehörde bei mindestens

⁴⁹UN-HABITAT, *Habitat III Issue papers - 22 Informal Settlements*, ([75], 2015)

⁵⁰MAHABIR U. A., „The study of slums as social and physical constructs“, ([130], 2016)

⁵¹KUFFER, PFEFFER UND SLIUZAS, „Slums from Space—15 Years of Slum Mapping Using Remote Sensing“, ([117], 2016)

⁵²Falls alternative Bezeichnungen verwendet werden, geschieht dies unter Rückgriff auf die Bezeichnung, die in der jeweils zitierten Literatur- oder Datenquelle für diese Siedlungsareale verwendet wurde.

⁵³LILFORD U. A., „Because space matters“, ([123], 2019)

⁵⁴THOMSON U. A., „Need for an Integrated Deprived Area “Slum” Mapping System (IDE-AMAPS) in Low- and Middle-Income Countries (LMICs)“, ([212], 2020)

50 Gebäuden⁵⁵. Eine Datenbank global einheitlich erhobener Informationen zur Bevölkerung in informelle Siedlungen ist somit nicht vorhanden⁵⁶. Auch zeigen der oben aufgeführte Vergleich und Analysen⁵⁷ wissenschaftlicher Arbeiten, dass die Definition von Slums stark von der Expertengruppe abhängt, die sich mit ihr auseinandersetzt.

Während die bisher erwähnten Konzepte informelle Siedlungen als Gruppe von Gebäuden oder Gebäudeblocks definieren, gibt es in der neueren Literatur abweichende Ansätze, um sich dem Phänomen dieser Siedlungsart zu nähern. So verstehen Brelsford und andere⁵⁸ Slums vor allem als eine topologische Anordnung von Gebäuden. Dovey wiederum plädiert mit anderen^{59,60} dafür die englische Bezeichnung *informal settlement* als Verb und nicht als Nomen zu verstehen. Sie kritisieren das Vorgehen, städtische Areale mit diesen Bezeichnungen zu versehen, da die informelle Siedlungsnahme vor allem als Prozess zu verstehen sei, der neuen Wohnraum schafft.

Lilford und andere⁶¹ weisen trotz dieser andauernden Diskussion darauf hin, dass eine einheitliche Definition und damit Erfassung dieser Siedlungen aus unterschiedlichen Gründen sinnvoll wäre: (i) wissenschaftliche Analyse, (ii) Entscheidungsgrundlage für Investitionen oder rechtliche Anpassungen der Besitzverhältnisse und (iii) um die zeitliche Entwicklung zu beobachten, sowie Maßnahmen zur Anpassung der Lebensbedingungen der Bewohner dieser Siedlungen beurteilen zu können.

Aus diesem Grund schlagen die Autoren^{61,62} Kriterien für die Definition von Slums oder informellen Siedlungen vor, wie beispielsweise physikalische oder soziale Charakteristiken der jeweiligen Siedlungsgebiete. Allerdings arbeiten die Autoren auch heraus, dass einheitliche Definitionen häufig nicht möglich sind, sondern kontextuell entschieden werden müssen.

Während auf der einen Seite keine umfassende Definition dieser Siedlungsareale möglich zu sein scheint und eine binäre Einteilung in *Slum* oder *Nicht-Slum* den Lebenswirklichkeiten der Bewohner nicht gerecht wird⁶¹, kann andererseits gezeigt werden, dass viele der oben angeführten Aspekte von Armut (unzureichender Wohnraum, mangelhafter Zugang zu Infrastrukturen, schlechte

⁵⁵Im Brasilianischen Zensus werden diese Gebiete als „subnormale Agglomeration“ bezeichnet.

⁵⁶KOHLI, KUFFER UND GEVAERT, „The Generic Slum Ontology“, ([101], 2019)

⁵⁷KOHLI U. A., „An ontology of slums for image-based classification“, ([102], 2012)

⁵⁸BRELSFORD U. A., „Toward cities without slums“, ([20], 2018)

⁵⁹DOVEY U. A., „Towards a morphogenesis of informal settlements“, ([38], 2020)

⁶⁰DOVEY U. A., „Viewpoint Informal settlement is not a euphemism for ‘slum’“, ([39], 2020)

⁶¹LILFORD U. A., „Because space matters“, ([123], 2019)

⁶²THOMSON U. A., „Need for an Integrated Deprived Area “Slum” Mapping System (IDE-AMAPS) in Low- and Middle-Income Countries (LMICs)“, ([212], 2020)

Hygienebedingungen durch fehlende Sanitrsanlagen) mit einer bestimmten physischen Siedlungsstruktur bzw. Siedlungsmorphologie einhergehen^{63,64}. Durch die Siedlungsnahme unabhängig von örtlichen Regularien sind die Siedlungen wie bereits erwähnt häufiger an Berghngen⁶⁵ oder an Orten mit hoher berflutungsgefahr⁶⁶ zu finden, was die Vulnerabilität der Bewohner in Bezug auf Naturkatastrophen stark erhöht.

Daneben sind vor allem aus der Medizin diverse sogenannte Querschnittstudien bekannt, die untersuchen, inwieweit sich bestimmte gesundheitliche Aspekte zwischen Bewohnern von informellen und formellen Siedlungen voneinander unterscheiden. Sowohl in Hinblick auf die Morbidität, Mortalität als auch im Zugang zu Gesundheitsversorgung sind diese Siedlungsformen im Vergleich zu ihrer Umgebung benachteiligt⁶⁷. So wurde das Risiko für Komplikationen in der Schwangerschaft für Frauen in Bangladesh⁶⁸, die Ernährung von Frauen in unterschiedlichen indischen Stdten⁶⁹, das Resultat der Behandlung von Tuberkulose Patienten in Brasilien⁷⁰ oder das Rauchverhalten von Männern in Bangladesh⁷¹ untersucht. Auf einer allgemeinen Ebene untersuchen Snyder und andere⁷² den Einfluss von sozialen und räumlichen Einflüssen auf die Gesundheit von Bewohnern unterschiedlicher Viertel in der Stadt Rio de Janeiro. All diese Studien zeigen, dass Einwohner von informellen Siedlungen auf vielen Ebenen benachteiligt sind.

Grundsätzlich kann auf Basis dieser Beobachtungen festgehalten werden, dass große Herausforderungen in der Formulierung einer angemessenen Definition von Slums existieren. Gleichzeitig zeigt sich, dass sich neben der Bebauungsstruktur der häufig als Slums bezeichneten Gebiete, auch die Le-

⁶³TAUBENBCK U. A., „Are the Poor Digitally Left Behind?“, ([209], 2018)

⁶⁴WURM UND TAUBENBÖCK, „Detecting social groups from space – Assessment of remote sensing-based mapped morphological slums using income data“, ([237], 2018)

⁶⁵MLLER U. A., „Misperceptions of Predominant Slum Locations?“, ([143], 2020)

⁶⁶EZEH U. A., „The history, geography, and sociology of slums and the health problems of people who live in slums“, ([46], 2017)

⁶⁷ZULU U. A., „Overview of migration, poverty and health dynamics in Nairobi City’s slum settlements“, ([242], 2011)

⁶⁸ISLAM UND SULTANA, „Risk factors for pregnancy related complications among urban slum and non-slum women in Bangladesh“, ([94], 2019)

⁶⁹GAUR, KESHRI UND JOE, „Does living in slums or non-slums influence women’s nutritional status?“, ([61], 2013)

⁷⁰SNYDER U. A., „Risk factors for differential outcome following directly observed treatment (DOT) of slum and non-slum tuberculosis patients“, ([199], 2016)

⁷¹KHAN U. A., „Prevalence and correlates of smoking among urban adult men in Bangladesh“, ([99], 2009)

⁷²SNYDER U. A., „A Comparison of Social and Spatial Determinants of Health Between Formal and Informal Settlements in a Large Metropolitan Setting in Brazil“, ([198], 2014)

bensbedingungen ihrer Bewohner deutlich von ihrer Umgebung unterscheiden. Diese schlechten Lebensbedingungen werden immer wieder mit der fehlenden Infrastruktur in diesen Siedlungen in Verbindung gebracht^{66,73}.

2.4 Infrastrukturen

Infrastrukturen beschreiben dem Wort nach Gebilde, ob physischer oder virtueller Natur, die hinter oder im Hintergrund von Strukturen liegen⁷⁴. Im Kontext der Urbanisierung werden unter Infrastrukturen meist Verbindungen oder Netzwerke verstanden, durch die Strukturen (Wohneinheiten, Gebäude oder ganze Areale) mit Informationen, Energie oder materiellen Gütern versorgt werden. Der Bau oder das Vorhandensein von Infrastrukturen kann als Kennzeichen von Urbanisierung und von Städten angesehen werden⁷⁵.

Allgemeiner kann davon gesprochen werden, dass die Bereitstellung von Infrastrukturen an Wohnorten von Menschen auf unterschiedlichen Ebenen als Ziel menschlicher Entwicklung betrachtet wird. Dies wird bei einer Analyse der im Jahr 2015 verabschiedeten Nachhaltigkeitsziele⁷⁶ der Vereinten Nationen deutlich, die den Rahmen des Handelns der weltweiten Staatengemeinschaft bis zum Jahr 2030 skizzieren. So wird in Ziel 6 *Ausreichend Wasser in bester Qualität* der Zugang zu sicherem und bezahlbarem Trinkwasser sowie ein angemessener Zugang zu Sanitäreinrichtungen für alle Menschen angestrebt. In Ziel 7 *Bezahlbare und saubere Energie* wird explizit eine Erweiterung der Infrastrukturen für moderne und nachhaltige Stromversorgung adressiert. Ziel 9 *Industrie, Innovation und Infrastruktur* trägt das Bestreben nach resilienten Infrastrukturen im Namen und im bereits erwähnten Ziel 11 *Nachhaltige Städte und Gemeinden* wird für alle Menschen der Zugang zu Basisversorgung, sowie zu bezahlbaren Transportmöglichkeiten angestrebt.

Die meisten dieser Infrastrukturen, wie die Wasser- und Energieversorgung, sowie die Abwasserentsorgung sind physisch in den Städten vorhanden. Dies können im Falle zentraler oder semizentraler Versorgung Kanal-, Kabel- oder Straßennetze sein und im Falle dezentraler Versorgung Transportfahrzeuge wie beispielsweise Lastkraftwagen⁷⁷.

Werden in einem globalen Kontext Städte hinsichtlich ihrer Infrastrukturen

⁷³LILFORD U. A., „Improving the health and welfare of people who live in slums“, ([124], 2017)

⁷⁴LAACK, *Alles im Fluss*, ([119], 2018)

⁷⁵BRYAN, GLAESER UND TSIVANIDIS, „Cities in the Developing World“, ([23], 2020)

⁷⁶<https://sdgs.un.org/goals> Abgerufen am 18. Januar 2021.

⁷⁷FRIESEN, RAUSCH UND PELZ, „Providing water for the poor - towards optimal water supply infrastructures for informal settlements by using remote sensing data“, ([55], 2017)

untersucht, fällt auf, dass diese vor allem im Globalen Süden stark unterschiedliche Formen annehmen. Bestimmte Gebiete in diesen Städten weisen eine ähnliche Morphologie und Versorgungsinfrastrukturen, wie im Globalen Norden auf. Davon unterscheiden sich die oben bereits beschriebenen und zum Teil sehr großen informellen Siedlungsareale mit ihren meist hohen Gebäudedichten, sehr schmalen Straßenzügen und einer organischen, scheinbar ungeplanten Morphologie. Diese Siedlungsareale und mit ihnen auch ihre Bewohner sind häufig nicht an vorhandene Infrastrukturen für Wasserver- oder Abwasserentsorgung angeschlossen^{78,79}. Dieser schlechte Zugang zu Infrastrukturen⁸⁰ in informellen Siedlungsarealen hat neben den oben bereits erwähnten gesundheitlichen Nachteilen weitreichende Folgen für deren Bewohner. Die Abwesenheit von Infrastrukturen verstärkt beispielsweise soziale Ungleichheiten. Die häufig für den Haushalt zuständigen Frauen oder Kinder verlieren durch lange Wege für den Transport von Wasser Zeit, die dadurch nicht mehr für Bildung oder andere Tätigkeiten zur Verfügung steht⁸¹.

Um die Nachteile für die Bewohner dieser Siedlungen zu verringern, wurde in den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl von Projekten zur Aufwertung dieser Siedlungen und deren Anschluss an die jeweiligen städtischen Infrastrukturen durchgeführt. Die Evaluationen^{82,83,84,85} dieser Ansätze stimmen darin überein, dass der Ausbau der Infrastrukturen zur Wasserversorgung mit einem verminderten Auftreten unterschiedlicher Krankheiten korreliert, und beispielsweise die Kindersterblichkeit aufgrund von Durchfallerkrankungen reduziert werden konnte. Gleichzeitig wird betont, dass weiterhin ein großer Teil informeller Siedlungen nicht an Wasserversorgungen angeschlossen sind⁸⁵. Es sind außerdem weitere Studien notwendig, um zu untersuchen, welche der Aufwertemaßnahmen in diesen Siedlungen, wie z.B. der Bau von Straßen oder

⁷⁸PATEL, KOIZUMI UND CROOKS, „Measuring slum severity in Mumbai and Kolkata“, ([154], 2014)

⁷⁹WORLD HEALTH ORGANIZATION, „Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2017 update and SDG baselines“, ([235], 2017)

⁸⁰OUI UND PHUA, „Urbanization and Slum Formation“, ([148], 2007)

⁸¹PARIKH U. A., „Infrastructure Provision, Gender, and Poverty in Indian Slums“, ([152], 2015)

⁸²BUTALA, VANROOYEN UND PATEL, „Improved health outcomes in urban slums through infrastructure upgrading“, ([24], 2010)

⁸³TURLEY U. A., „Slum upgrading strategies involving physical environment and infrastructure interventions and their effects on health and socio-economic outcomes“, ([221], 2013)

⁸⁴MCDONALD U. A., „Water on an urban planet“, ([136], 2014)

⁸⁵DESHPANDE U. A., „Mapping geographical inequalities in access to drinking water and sanitation facilities in low-income and middle-income countries, 2000–17“, ([37], 2020)

der Anschluss an Wasserinfrastrukturen, welchen Effekt auf die Gesundheit der Bewohner hat⁸³. Auch stellt sich die Frage nach der Nachhaltigkeit dieser Aufwertemaßnahmen⁸⁶.

Olthuis und andere⁸⁷ analysieren aktuelle Aufwertemaßnahmen in einzelnen informellen Siedlungen in Nigeria, Kenia, Pakistan, Bangladesh und den Philippinen und ihre räumliche Entwicklung innerhalb von zehn Jahren. Sie folgern, dass aufgrund der schnellen Veränderung dieser Siedlungen aktuelle Informationen über die räumliche Struktur von größter Wichtigkeit sind und deshalb in der Planung von Aufwerteprogrammen möglichst auf satellitendatenerfasste Daten zurückgegriffen werden sollte. Auch Owens, Gulyani und Rizvi⁸⁸ zeigen in zwei indischen Städten, dass die Kenntnis der Größe typischer Gebäude in informellen Siedlungen ein wichtiger Beitrag zur erfolgreichen Implementierung von Aufwerteprogrammen ist. Die Größe der für die Ansiedlung von Menschen zum Verkauf gestellten Grundstücke und Häuser war, im Vergleich zu älteren nicht erfolgreichen Projekten, an die realen Bedürfnisse der Menschen angepasst.

Die vorangegangenen Ausführungen zeigen einerseits die Problematik, dass viele informelle Siedlungen nicht an die Infrastrukturen der jeweiligen Städte angeschlossen sind und gleichzeitig den enormen Wert, den Infrastrukturen zur Schaffung oder Aufrechterhaltung der Gesundheit und Lebensqualität in unterschiedlichen Dimensionen haben.

Außerdem wird deutlich, dass für die Planung und Entwicklung nachhaltiger Infrastrukturprojekte die Kenntnis städtischer Skalen und ihrer zeitlichen Entwicklung von größter Wichtigkeit sind, was sowohl auf Stadtebene^{89,90,91,92}, als auch explizit für die Planung von Aufwerteprogrammen für informelle Siedlungen betont wird^{93,94}.

Um sich der Frage nach den Skalen informeller Siedlungen und ihrer Entwicklung zur Planung von Infrastruktur auf einer möglichst allgemeingültigen Ebene zu nähern, wird im Folgenden sowohl der aktuelle Stand der For-

⁸⁶DEGERT, PARIKH UND KABIR, „Sustainability assessment of a slum upgrading intervention in Bangladesh“, ([36], 2016)

⁸⁷OLTHUIS U. A., „Slum Upgrading“, ([147], 2015)

⁸⁸OWENS, GULYANI UND RIZVI, „Success when we deemed it failure?“, ([149], 2018)

⁸⁹BATTY, „The Size, Scale, and Shape of Cities“, ([10], 2008)

⁹⁰BETTENCOURT, „The Origins of Scaling in Cities“, ([15], 2013)

⁹¹LAACK, *Alles im Fluss*, ([119], 2018)

⁹²TONNE U. A., „Defining pathways to healthy sustainable urban development“, ([216], 2021)

⁹³HACHMANN, JOKAR ARSANJANI UND VAZ, „Spatial data for slum upgrading“, ([78], 2018)

⁹⁴GEVAERT, KOHLI UND KUFFER, „Challenges of mapping the missing spaces“, ([62], 2019)

schung im Hinblick auf die (i) Erfassung als auch auf die (ii) Modellierung dieser Siedlungsstrukturen zusammengetragen, um die global vorhandenen Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu identifizieren.

2.5 Erfassung und Modellierung

Für die Entwicklung technischer Innovationen für ein System, ist zunächst ein umfassendes Verständnis dieses Systems notwendig. Dieses Verständnis wird in der Einleitung als *Struktur-* und *Regelwissen* bezeichnet. Auf die in dieser Arbeit zu bearbeitenden Forschungsfragen bezogen, müssen für eine Planung von Infrastrukturen für informelle städtische Siedlungsareale deren Skalen ermittelt⁹⁵ und deren Entwicklung verstanden und modelliert werden. Mahabir und andere⁹⁶ zeigen, dass jede Beobachtung und Modellierung einer Siedlungsklasse immer von einer bestimmten Vorstellung von dieser Siedlungsklasse abhängt. So fokussiert sich eine Modellierung informeller Siedlungen aus ökonomischer Perspektive auf die ein- und ausfließenden Geldströme, eine Modellierung einer Krankheitsausbreitung in den Siedlungen dagegen auf epidemiologische Faktoren. Die technikwissenschaftliche Perspektive dieser Arbeit verwendet eine physisch geprägte Sichtweise auf informelle Siedlungsareale, die sich auf die Morphologie dieser Siedlungen fokussiert. Dabei steht die physisch messbare Welt im Fokus, die durch die Basiseinheiten *Masse*, *Länge*, *Zeit*, *Temperatur*, *Lichtstärke*, *elektrische Stromstärke* und *Stoffmenge* beschrieben werden kann.

2.5.1 Erfassung

Um informelle Siedlungen urbaner Armut innerhalb eines spezifischen Gebietes identifizieren zu können, ist es notwendig, diese von Arealen anderer Siedlungsklassen⁹⁷ zu unterscheiden. In der Literatur sind unterschiedliche Ansätze bekannt, um urbane Räume zu klassifizieren. Diese können grundsätzlich in umfragenbasierte und fernerkundungsbasierte Erfassung von informellen Siedlungen eingeteilt werden^{98,99}.

⁹⁵HACHMANN, JOKAR ARSANJANI UND VAZ, „Spatial data for slum upgrading“, ([78], 2018)

⁹⁶MAHABIR U. A., „The study of slums as social and physical constructs“, ([130], 2016)

⁹⁷ANDERSON, *A land use and land cover classification system for use with remote sensor data*, ([5], 1976)

⁹⁸LILFORD U. A., „Because space matters“, ([123], 2019)

⁹⁹KUFFER, PFEFFER UND SLIUZAS, „Slums from Space—15 Years of Slum Mapping Using Remote Sensing“, ([117], 2016)

Umfragenbasierte Erfassung

Eine bis heute verwendete Methode ist die Erfassung dieser Siedlungsareale im Rahmen von Umfragen. Dabei werden Eigenschaften von Gebäuden durch die fragenden Personen erfasst und dokumentiert. Liegt die Anzahl an Gebäuden, die bestimmte Merkmale aufweisen über einem vorher definierten Schwellwert, so wird dieses Gebiet als Slum oder informelle Siedlung klassifiziert. Diese Methodik ist einerseits sehr genau, da neben äußeren Merkmalen der Behausung auch Informationen zur Wasser- oder Sanitätsversorgung sowie dem physischen oder psychischen Empfinden der Bewohner ermittelt werden können. Andererseits weist diese Methode auch erhebliche Nachteile auf^{100,101}. Sie ist mit einem hohen Zeit- und Arbeitsaufwand verbunden, da neben der eigentlichen Umfrage das Vorgehen geplant, koordiniert und die Daten daraufhin aggregiert und aufbereitet werden müssen. Diese Daten werden deshalb häufig nur in den alle zehn Jahre stattfindenden Zensus von Ländern wie Brasilien oder Indien von offizieller Seite erfasst und bilden in manchen Fällen zum Zeitpunkt ihrer Veröffentlichung bereits nicht mehr die vorhandene Situation ab¹⁰¹.

Eine weitere Möglichkeit der Erfassung von Slums liegt in sogenannten Crowd-Sourcing Initiativen. Diese bauen vor allem auf die Mitwirkung der jeweiligen Bewohner auf und können ein sehr umfassendes Bild der Siedlungen vermitteln. Ein bekanntes Beispiel dafür ist die Map Kibera Initiative, in der die Bewohner einer der bekanntesten informellen Siedlungen im sub-Saharischen Afrika sowohl Gebäude¹⁰², als auch Sanitäranlagen oder Punkte der Wasserversorgung erfassen und geographisch kodieren.

Fernerkundungsbasierte Erfassung

Neben der umfragenbasierten Erfassung informeller Siedlungen hat sich in den letzten Jahren vor allem die fernerkundungsbasierte Erfassung informeller

¹⁰⁰KUFFER, PFEFFER UND SLIUZAS, „Slums from Space—15 Years of Slum Mapping Using Remote Sensing“, ([117], 2016)

¹⁰¹MAHABIR U. A., „A Critical Review of High and Very High-Resolution Remote Sensing Approaches for Detecting and Mapping Slums“, ([129], 2018)

¹⁰²MAHABIR U. A., „The study of slums as social and physical constructs“, ([130], 2016)

Siedlungen etabliert¹⁰³. In diesen Verfahren werden sowohl optische¹⁰⁴, als auch durch Radar¹⁰⁵ generierte Satellitendaten urbaner Gebiete genutzt, um anhand der durch die Sensoren erfassten Strahlungsmuster informelle Gebiete von ihrer Umgebung zu unterscheiden. Vor allem in den letzten 20 Jahren hat es in diesem Bereich enorme Fortschritte gegeben, wie Kuffer und andere¹⁰⁶ oder Mahabir und andere^{107,108} eindrücklich zeigen. Die Anzahl der Veröffentlichungen zu Slums korreliert mit der steigenden Verfügbarkeit von Satellitendaten und deren höheren räumlichen und zeitlichen Auflösungsvermögen¹⁰⁶. Dadurch können im Gegensatz zur umfragenbasierten Erfassung sich rasant verändernde physische Strukturen mit einem relativ geringen Aufwand erfasst werden¹⁰⁹.

Auch sind durch die Kombination von Fernerkundungsdaten mit stichprobenartigen Umfragen Schätzungen der Bevölkerungsdichten und damit der Bevölkerungsanzahl in den informellen Siedlungen möglich^{110,111}. Neuere Ansätze^{112,113,114} verwenden Methoden des maschinellen Lernens oder der Künstlichen Intelligenz, um diese Siedlungsarten zu erfassen.

In der Literatur wird detailliert über die Unsicherheit in der Erfassung die-

¹⁰³Das Ziel dieser Zusammenfassung ist kein umfassender Überblick über den Stand der Forschung in der fernerkundungsbasierten Identifikation informeller Siedlungen. Dafür sei beispielsweise auf die umfangreichen Reviews von Kuffer [117] oder Mahabir [129] verwiesen. Vielmehr werden an ausgewählten Arbeiten die Möglichkeiten und Zukunftsperspektiven dieser Methodik aufgezeigt.

¹⁰⁴TAUBENBÖCK UND KRAFF, „The physical face of slums: a structural comparison of slums in Mumbai, India, based on remotely sensed data“, ([207], 2014)

¹⁰⁵WURM U. A., „Slum mapping in polarimetric SAR data using spatial features“, ([238], 2017)

¹⁰⁶KUFFER, PFEFFER UND SLIUZAS, „Slums from Space—15 Years of Slum Mapping Using Remote Sensing“, ([117], 2016)

¹⁰⁷MAHABIR U. A., „The study of slums as social and physical constructs“, ([130], 2016)

¹⁰⁸MAHABIR U. A., „A Critical Review of High and Very High-Resolution Remote Sensing Approaches for Detecting and Mapping Slums“, ([129], 2018)

¹⁰⁹KIT UND LÜDEKE, „Automated detection of slum area change in Hyderabad, India using multitemporal satellite imagery“, ([100], 2013)

¹¹⁰MOSSOUX U. A., „Mapping Population Distribution from High Resolution Remotely Sensed Imagery in a Data Poor Setting“, ([142], 2018)

¹¹¹TAUBENBÖCK UND WURM, „Ich weiß, dass ich nichts weiß – Bevölkerungsschätzung in der Megacity Mumbai“, ([210], 2015)

¹¹²LIU, KUFFER UND PERSELLO, „The Temporal Dynamics of Slums Employing a CNN-Based Change Detection Approach“, ([125], 2019)

¹¹³WANG U. A., „Deprivation pockets through the lens of convolutional neural networks“, ([229], 2019)

¹¹⁴WURM U. A., „Semantic segmentation of slums in satellite images using transfer learning on fully convolutional neural networks“, ([236], 2019)

ser Siedlungsareale diskutiert¹¹⁵, wobei beispielsweise die Klassifikationen unterschiedlicher Interpreten miteinander verglichen werden^{116,117,118}.

Obwohl durch diese Art der Erfassung keine direkten Informationen über die Infrastrukturen zur Wasserver- und Abwasserentsorgung ermittelt werden können und nur einer der oben genannten fünf Aspekte einer Slumdefinition adressiert wird, der Zustand der Behausung, ist die Methode das wichtigste Instrument in der Identifikation und Analyse informeller Siedlungen für die Planung von Infrastrukturen. Das liegt daran, dass sie auf der Erfassung physisch messbarer Werte beruht, der hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung und der daraus resultierenden Vergleichbarkeit der Ergebnisse, sowie der Möglichkeit, die Informationen mit einem relativ geringen Aufwand mit anderen Datenquellen zu kombinieren.

Ontologie

In beiden oben beschriebenen Arten der Erfassung informeller Siedlungen stellt sich die grundsätzliche Frage nach der Ontologie dieser Siedlungsstrukturen, also der Frage, welche Eigenschaften diese Siedlungsstruktur definieren und nach welchen Kriterien die Interpreten (ob Mensch oder Algorithmus) eine Zuordnung vornehmen. Wie bereits oben dargestellt, wird in den letzten Jahrzehnten vielfach darüber diskutiert, welche Definition dieser Siedlungsarten angemessen ist.

Kohli und andere¹¹⁹ haben hierfür eine detaillierte Ontologie für Slums vorgelegt, indem sie Experten darüber befragen, welche Eigenschaften ein Slum definieren. Das Resultat ist ein intersubjektives Verständnis von Slums. Die Autoren definieren Slums anhand von Eigenschaften (i) ihrer Umgebung, (ii) ihrer Siedlungsstruktur, sowie (iii) der einzelnen Siedlungsobjekte. Sie stellen mit ihrer Ontologie ein Gerüst vor, auf dessen Basis Methoden zur Erfassung dieser Siedlungsarten durchgeführt werden können.

Aufbauend auf dieser Ontologie¹¹⁹ wird durch Taubenböck, Wurm und Kraff¹²⁰

¹¹⁵GEVAERT, KOHLI UND KUFFER, „Challenges of mapping the missing spaces“, ([62], 2019)

¹¹⁶KOHLI, STEIN UND SLIUZAS, „Uncertainty analysis for image interpretations of urban slums“, ([103], 2016)

¹¹⁷KRAFF, WURM UND TAUBENBÖCK, „Uncertainties of Human Perception in Visual Image Interpretation in Complex Urban Environments“, ([111], 2020)

¹¹⁸JATI PRATOMO U. A., „Coupling Uncertainties with Accuracy Assessment in Object-Based Slum Detections, Case Study“, ([95], 2017)

¹¹⁹KOHLI U. A., „An ontology of slums for image-based classification“, ([102], 2012)

¹²⁰TAUBENBÖCK, KRAFF UND WURM, „The morphology of the Arrival City - A global categorization based on literature surveys and remotely sensed data“, ([208], 2018)

ein empirischer Nachweis dieser Siedlungsart durchgeführt. In dieser Studie vergleichen die Autoren 44 Morphologien unterschiedlicher Ankunftsstädte miteinander. Die Autoren nutzen den Begriff der Ankunftsstadt dabei als Überbegriff, um neben informellen Siedlungen auch *strukturierte* Ankunftsstädte, wie beispielsweise große Häuserblocks in Berlin Kreuzberg, zu erfassen. Sie greifen dabei das Konzept der Ankunftsstadt von Saunders¹²¹ auf, der die häufig als Armutsviertel oder Siedlungen urbaner Armut beschriebenen und damit negativ konnotierten Siedlungsareale, ihrer Funktion nach bezeichnet. Diese dienen häufig als *Eintrittspunkte*¹²² für *arme* Menschen in die Städte. Durch eine Literaturrecherche identifizieren die Autoren Ankunftsstädte in unterschiedlichen Regionen der Erde und quantifizieren deren physische Morphologie durch unterschiedliche Metriken auf unterschiedlichen Skalen. Diese sind die Gebäude-Ebene, die Block-Ebene und die Distrikt-Ebene. Dabei werden die einzelnen Gebäude erfasst und digitalisiert. Auf einer höheren Block-Ebene werden verschiedene Metriken erfasst. Diese sind beispielsweise die Grundfläche der einzelnen Gebäude innerhalb des Blocks, die Gebäudehöhen, die Gebäudedichte, die Orientierung der Gebäude zueinander und die Heterogenität der einzelnen Blöcke im Verhältnis zu ihrer Umgebung. Auf der Siedlungsebene werden dafür Parameter wie eine hohe Siedlungsdichte und eine organische, komplexe Anordnung an Gebäuden ermittelt. Auf der Objektebene werden kleine Gebäudegrundflächen und -höhen als Charakteristik verwendet¹²³.

Auf der Distrikt-Ebene werden die oben beschriebenen Metriken schlussendlich ausgewertet, indem ein morphologischer Siedlungstyp-Index ermittelt wird. Dieser unterscheidet die einzelnen Gebiete in idealtypische Slums, morphologische Slums, gemischt strukturiert-unstrukturierte Übergangsgebiete und strukturierte Siedlungsgebiete. Die Übergänge zwischen den hier erwähnten Kategorien sind fließend und nicht ausschließlich zu verstehen.

Diese stark quantitative und auf die Beurteilung der physisch vorhandenen Bebauungsstruktur fokussierte Betrachtungsweise von Ankunftsstädten, die häufig mit urbaner Armut korrelieren, wird im weiteren Verlauf der Arbeit aufgegriffen und verwendet. Dabei werden allerdings nicht alle Arten von Ankunftsstädten untersucht, sondern vor allem *morphologische Slums*, die durch die Kennzeichen der kleinen Größe der einzelnen Gebäude, der hohen Gebäudedichte und der organischen Struktur geprägt sind. Für diese Art

¹²¹SAUNDERS, *Die neue Völkerwanderung - Arrival City*, ([187], 2013)

¹²²ROY U. A., „The emergence of slums: A contemporary view on simulation models“, ([185], 2014)

¹²³TAUBENBÖCK UND KRAFF, „The physical face of slums: a structural comparison of slums in Mumbai, India, based on remotely sensed data“, ([207], 2014)

Siedlungen konnte gezeigt werden, dass die beschriebene Morphologie mit einer bestimmten sozialen Gruppe einhergeht, in welcher beispielsweise das durchschnittliche Einkommen geringer, als in ihrer Umgebung ist¹²⁴.

Die zuletzt beschriebenen Arbeiten zeigen, dass in der Geographie in den letzten Jahren intensiv an einer Ontologie zur Beschreibung informeller Siedlungen gearbeitet wurde. In einem nächsten Schritt und aufbauend auf dieser Ontologie wurden Verfahren entwickelt, um Slums zu identifizieren und zu klassifizieren. Zuletzt hat sich in der Forschung nun immer stärker die Frage gestellt, in welcher Weise diese Informationen angewendet werden können. Erste Arbeiten dazu wurden beispielsweise von Taubenböck und anderen¹²⁵ vorgestellt, in denen untersucht wird, wie diese Erkenntnisse mit anderen Datenquellen kombiniert werden können. Die Autoren zeigen durch eine Analyse von räumlich kodierten Daten sozialer Medien, dass in morphologischen Slums in Verhältnis zu den umliegenden formellen Siedlungen weniger Tweets¹²⁶ abgesetzt werden. Diese Anwendungen, die meist nur in Kooperation mit anderen Disziplinen durchgeführt werden können, stehen allerdings gerade erst am Anfang.

2.5.2 Zeitliche Entwicklung

Neben der Identifizierung und Erfassung informeller Siedlungsareale wird zunehmend auch deren zeitliche Entwicklung beschrieben. So untersuchen Kit und andere¹²⁷ die zeitliche Entwicklung der Slums in Hyderabad, Indien zwischen 2003 und 2010. Sie stellen fest, dass die Gesamtfläche dieser Siedlungen in dem betrachteten Zeitraum um 70% zugenommen hat. In Bezug auf die Frage nach der Bereitstellung von Infrastrukturen ist dieser Aspekt von höchster Bedeutung¹²⁸. Eine größere Fläche informeller Siedlungen macht beispielsweise im Falle einer semizentralen Versorgung einerseits längere Leitungen und andererseits bei einer zusätzlich höheren Bevölkerungsanzahl größere Versorgungskapazitäten notwendig.

Obwohl die Kenntnis der zeitlichen Entwicklung von großer Bedeutung ist, sind bisher nur verhältnismäßig wenige Arbeiten zu dieser Thematik bekannt. Liu,

¹²⁴WURM UND TAUBENBÖCK, „Detecting social groups from space – Assessment of remote sensing-based mapped morphological slums using income data“, ([237], 2018)

¹²⁵TAUBENBÖCK U. A., „Are the Poor Digitally Left Behind?“, ([209], 2018)

¹²⁶Kurzmitteilungen des Messengerdienstes Twitter.

¹²⁷KIT UND LÜDEKE, „Automated detection of slum area change in Hyderabad, India using multitemporal satellite imagery“, ([100], 2013)

¹²⁸HACHMANN, JOKAR ARSANJANI UND VAZ, „Spatial data for slum upgrading“, ([78], 2018)

Kuffer und Persello¹²⁹ untersuchen beispielsweise die zeitliche Veränderung von Slums in einem Ausschnitt von Bangalore, Indien. Auch Kraff, Taubenböck und Wurm^{130,131} untersuchen die zeitliche Entwicklung von Siedlungen urbaner Armut. Die Autoren beziehen sich aber häufig auf einzelne Siedlungsareale und nicht auf die Gesamtheit informeller Siedlungen innerhalb einer Stadt. Studien, die die zeitliche Entwicklung von Slums mit einer einheitlichen Methodik in unterschiedlichen Städten untersuchen, sind in der einschlägigen Literatur bisher nicht vorhanden.

Neben der empirischen Untersuchung dieser Siedlungsareale hat sich deshalb in den letzten Jahren¹³² neben der Analyse von Fernerkundungsdaten auch die Modellierung dieser Siedlungsart etabliert.

2.5.3 Modellierungsansätze

Da die informell entstehenden Siedlungen weltweit etwa eine Milliarde Menschen beherbergen, ist es für lokale Entscheidungsträger, Raumplaner und Architekten von größter Wichtigkeit, das Auftreten dieser Siedlungen, sowie deren zeitliche Entwicklung oder die Prozesse der Entstehung dieser Siedlungsform mit Modellen abbilden zu können^{133,134}.

So sind in den letzten Jahrzehnten vielfältige Modelle zur Beschreibung dieser Siedlungsareale veröffentlicht worden. Diese sind beispielsweise zelluläre Automaten, in denen die Stadt in Gitterzellen aufgeteilt, und jede Zelle mit speziellen Eigenschaften versehen wird, die mit ihrer Umgebung interagieren kann. Daneben werden Multi-Agenten Systeme entwickelt, bei denen neben der oben beschriebenen Landnutzung Agenten modelliert werden, die sich auf dem Raster bewegen und mit ihrer Umgebung interagieren können¹³⁷.

Die Kernidee hinter diesen Modellierungen ist es, unterschiedliche Einflussfaktoren, die zum Wachstum oder der Veränderung von informellen Siedlungen beitragen, quantitativ zu beschreiben und die aus ihrer Wechselwirkung entstehenden Siedlungsmuster in silico abzubilden. Roy und andere¹³⁷ führen

¹²⁹LIU, KUFFER UND PERSELLO, „The Temporal Dynamics of Slums Employing a CNN-Based Change Detection Approach“, ([125], 2019)

¹³⁰KRAFF, WURM UND TAUBENBÖCK, „The dynamics of poor urban areas - analyzing morphologic transformations across the globe using Earth observation data“, ([110], 2020)

¹³¹KRAFF, TAUBENBÖCK UND WURM, „How dynamic are slums?“, ([109], 2019)

¹³²HOFMANN, TAUBENBÖCK UND WERTHMANN, „Monitoring and modelling of informal settlements - A review on recent developments and challenges“, ([89], 2015)

¹³³ROY U. A., „The emergence of slums: A contemporary view on simulation models“, ([185], 2014)

¹³⁴MAHABIR U. A., „The study of slums as social and physical constructs“, ([130], 2016)

als wichtige Faktoren, die zum Wachstum dieser Siedlungen beitragen, die Bevölkerungsentwicklung, das Wirtschaftswachstum, die Entwicklung des Immobilienmarkts, die in den Siedlungen vorhandene informelle Wirtschaft, die lokale Topographie, sowie die politischen Gegebenheiten in diesen Siedlungen auf. Diese Auflistung kann noch erweitert werden, wie andere Arbeiten^{135, 136} zeigen.

Roy und andere¹³⁷ listen unterschiedliche Simulationsmodelle auf und analysieren und bewerten die zum Zeitpunkt der Veröffentlichung in der Literatur bekannten Modelle. In den letzten Jahren sind weitere Modelle veröffentlicht worden, die teils mit ähnlichen Ansätzen arbeiten¹³⁸, teils aber auch Methoden des maschinellen Lernens anwenden¹³⁹, um die Entwicklung informeller Siedlungen zu beschreiben¹⁴⁰.

Die in diesen Veröffentlichungen aufgeführten Modelle weisen einen hohen Grad an Komplexität auf und basieren auf einer Interaktion verschiedener Faktoren, von denen der jeweilige Beitrag zum Simulationsergebnis nicht exakt zu ermitteln ist. Auch sind die Modellansätze häufig auf bestimmte lokale Charakteristika in den untersuchten Städten angepasst, wodurch globale Vergleiche erschwert werden. Zuletzt weisen die Autoren¹³⁷ darauf hin, dass neuere Ansätze möglichst alle von ihnen erwähnten Aspekte integrieren sollten. Diese Tatsache bestätigt den Trend in der Soziologie, in Modelle zur Beschreibung soziologischer Phänomene möglichst viele Faktoren und Nuancen zu integrieren. Dieser Trend wird allerdings bereits seit dem oben beschriebenen Beginn der soziologischen Forschung¹⁴¹ bis hinein ins 21. Jahrhundert¹⁴² kritisiert¹⁴³. Dabei wird auf eine Grundspannung in der Modellierung von Systemen hingewiesen¹⁴⁴: Einfachheit versus Komplexität. Modelle sind grundsätzlich nur Abbildungen der Wirklichkeit und lassen damit immer einen Teil der

¹³⁵EZEH U. A., „The history, geography, and sociology of slums and the health problems of people who live in slums“, ([46], 2017)

¹³⁶MAHABIR U. A., „The study of slums as social and physical constructs“, ([130], 2016)

¹³⁷ROY U. A., „The emergence of slums: A contemporary view on simulation models“, ([185], 2014)

¹³⁸ROY UND LEES, „Understanding resilience in slums using an agent-based model“, ([184], 2020)

¹³⁹IBRAHIM U. A., „predictSLUMS“, ([92], 2019)

¹⁴⁰BADMOS U. A., „Simulating slum growth in Lagos“, ([7], 2019)

¹⁴¹MENGER, *Die Irrtümer des Historismus in der deutschen Nationalökonomie*, ([140], 1884)

¹⁴²HEALY, „Fuck Nuance“, ([82], 2017)

¹⁴³Auch in der natur- und ingenieurwissenschaftlichen Forschung wird über diese Frage diskutiert, wie Holl [90] eindrücklich am Beispiel von Helmholtz [83] zeigt.

¹⁴⁴PEARCE UND MERLETTI, „Complexity, simplicity, and epidemiology“, ([155], 2006)

Wirklichkeit außer acht¹⁴⁵. Sie sollten sich vielmehr auf die relevante Realität beziehen. Deshalb stellt sich zwangsläufig die Frage, ob zur Beschreibung eines Phänomens eine detaillierte Beschreibung aller dabei wechselwirkenden Grundphänomene notwendig ist, oder ob das grundsätzliche Verhalten auch durch eine geringe Anzahl an Grundannahmen abgebildet werden kann¹⁴⁶. Den hier vorgestellten in der Literatur bekannten Modellen soll deshalb im Rahmen dieser Arbeit eine Alternative gegenüber gestellt werden.

2.6 Städte als Organismen

In der Beschreibung und Modellierung städtischer Systeme hat nach Batty¹⁴⁷ in den letzten Jahren ein Paradigmenwechsel stattgefunden. Während die Stadt früher vor allem mechanisch als „Maschine“ verstanden wurde, wird sie nun stärker als „Organismus“ begriffen^{148,149}. Dieser Trend der Analogiensuche zwischen biologischen und sozialen Systemen ist nicht neu. So verwenden die beiden bekanntesten soziologischen Systemtheorien des 20. Jahrhunderts von Talcott Parsons¹⁵⁰ und Niklas Luhmann¹⁵¹ in vielfältiger Weise Theorien aus der Biologie zur Beschreibung sozialer Systeme.

Die Beschreibung von Städten als Organismen kann beispielhaft in den Arbeiten von Portugali¹⁵² oder West¹⁵³ nachvollzogen werden. Beide betonen den Netzwerkcharakter von Städten und legen damit einen großen Fokus auf die in der Stadt vorhandenen Infrastrukturen. Infrastrukturen werden in diesen und weiteren Arbeiten analog zu Leitungsbahnen (Nerven, Arterien und Venen) in der Anatomie verstanden. Ähnlich wie das Blut oder elektrische Signale mithilfe des Kreislaufsystems bzw. der Nervenbahnen durch den Körper transportiert werden, werden in einer Stadt Waren, Energie und Informationen mithilfe von Infrastrukturen bewegt und mit ihrer Umwelt ausgetauscht.

¹⁴⁵PELZ U. A., *Mastering Uncertainty in Mechanical Engineering*, ([156], 2021)

¹⁴⁶PAOLA UND LEEDER, „Simplicity versus complexity“, ([151], 2011)

¹⁴⁷BATTY, „Building a science of cities“, ([11], 2012)

¹⁴⁸BETTENCOURT, „The Origins of Scaling in Cities“, ([15], 2013)

¹⁴⁹BETTENCOURT U. A., „Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities“, ([16], 2007)

¹⁵⁰PARSONS, „On building social system theory: A personal history“, ([153], 1970)

¹⁵¹LUHMANN, *Soziale Systeme*, ([127], 2018)

¹⁵²PORTUGALI, *Complexity, cognition and the city*, ([159], 2011)

¹⁵³WEST, *Scale: the universal laws of growth, innovation, sustainability, and the pace of life in organisms, cities, economies, and companies*, ([231], 2017)

Städte sind in diesem Verständnis^{154,155,156} nicht abgeschlossen, sondern offen gegenüber ihrer Umgebung und entwickeln sich in Wechselwirkung mit dieser durch Selbstorganisation stetig weiter¹⁵⁷.

Auch die Tatsache, dass jeder Organismus unterschiedliche Aufgaben mithilfe von Organen oder Organellen wahrnimmt und dadurch selbst aus Subsystemen besteht, wird auf Städte übertragen¹⁵⁸. In welcher Weise können in diesem Kontext dann informelle Siedlungen bzw. Slums verstanden werden? West beschreibt seine Sicht auf diese Siedlungsart folgendermaßen:

»Man könnte Slums als die Entwicklung eines besonderen Organs, oder als einen Tumor betrachten, der gewachsen ist und in gewisser Weise ungesund ist und letztendlich zur Zerstörung der Stadt führen könnte. Mein eigenes Gefühl ist, dass Slums wahrscheinlich ein bisschen von beidem sind. Eines der bemerkenswerten Dinge an Slums ist, dass sie ihre eigene soziale Organisation und Wirtschaft und sogar Kultur entwickeln, die auf einer gewissen Ebene funktional und in einigen Fällen bemerkenswert widerstandsfähig ist. Das ist irgendwie erstaunlich.«¹⁵⁹

Die Aussage ist ein Beispiel für eine in der Literatur häufig anzutreffende und als *privilegiert* bezeichnete Sicht auf diese Siedlungsform, in der informelle Siedlungen nicht als normaler Teil der Stadt, sondern als Fremdkörper wahrgenommen werden, von dem die Stadt gegebenenfalls befreit werden sollte¹⁶⁰. Andererseits bestätigt dieses Bild die bereits oben erwähnte Erfahrung, dass die informelle Siedlungsnahme zu Siedlungsmorphologien führt, die sich grundsätzlich von ihrer Umgebung unterscheiden.

Wie entsteht aber diese spezielle Morphologie bzw. wie kann der Prozess der Morphogenese¹⁶¹ informeller Siedlungen, der in neueren Veröffentlichungen auch von anderen Forschenden¹⁶² auf diese Siedlungsart angewendet wird,

¹⁵⁴BATTY, „Building a science of cities“, ([11], 2012)

¹⁵⁵PURVIS, MAO UND ROBINSON, „Entropy and its Application to Urban Systems“, ([167], 2019)

¹⁵⁶PULSELLI, RATTI UND TIEZZI, „City out of chaos“, ([166], 2006)

¹⁵⁷BROTO, ALLEN UND RAPOPORT, „Interdisciplinary Perspectives on Urban Metabolism“, ([21], 2012)

¹⁵⁸BETTENCOURT U. A., „Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities“, ([16], 2007)

¹⁵⁹Interview in Forbes, <https://www.forbes.com/sites/megacities/2011/04/11/physicist-geoffrey-west-on-solving-the-urban-puzzle/?sh=1cf2771102c7>, abgerufen am 21.12.2020.

¹⁶⁰MAYNE, *Slums*, ([134], 2017)

¹⁶¹Der Begriff *Morphogenese* beschreibt den Prozess der Entstehung der Form.

¹⁶²DOVEY U. A., „Towards a morphogenesis of informal settlements“, ([38], 2020)

beschrieben werden und ist es möglich diese Beschreibung in einer möglichst einfachen Weise durchzuführen?

Morphogenese informeller Siedlungen

Ausgehend von der oben beschriebenen Analogie zwischen urbanen Systemen und biologischen Organismen auf der einen Seite, und der polaren intra-urbanen Struktur vieler Städte des Globalen Südens, in der zwischen *arm* und *reich* unterschieden wird, auf der anderen Seite, wird im folgenden Kapitel ein Modell entwickelt, das die Ausbildung der Struktur morphologischer Slums mithilfe eines Modells aus der mathematischen Biologie abbildet¹⁶³. Die Hypothese lautet, dass die Morphogenese informeller Siedlungsstrukturen durch die Interaktion zweier sozialer Gruppen modelliert werden kann.

Das Konzept der Morphogenese, das die Frage nach der Entstehung der Struktur in einem Organismus oder einem System entsteht, wurde im 20. Jahrhundert aus unterschiedlichen Perspektiven untersucht. Vor allem die aus der Perspektive der Physik entwickelten Modelle, die in ihrer Beschreibung der Natur häufig auf kontinuumsmechanische, durch Differentialgleichungen berechenbare Ansätze zurückgreift, wird hier als Startpunkt zur Entwicklung eines alternativen Ansatzes gewählt. Dabei wird auf die Erkenntnis zurückgegriffen, dass selbst einfache mathematische Modelle ein äußerst komplexes Systemverhalten abbilden können¹⁶⁴.

¹⁶³PELZ, FRIESEN UND HARTIG, „Similar size of slums caused by a Turing instability of migration behavior“, ([157], 2019)

¹⁶⁴MAY, „Simple mathematical models with very complicated dynamics“, ([133], 1976)

Kapitel 3

Modellbildung

*Das ist die Eigenschaft der Dinge:
Natürlichem genügt das Weltall kaum,
Was künstlich ist, verlangt geschlossenen Raum.*

Johann Wolfgang von Goethe¹

Die Annahme, dass die Entwicklung von Städten der von Organismen gleicht, wird in diesem Kapitel detailliert untersucht. Dafür werden zunächst die grundlegenden Arbeiten zur Analyse des Lebens aus physikalischer Perspektive eingeführt (Abschnitt 3.1). Diese werden daraufhin auf die Strukturbildung, also die Morphogenese, informeller urbaner Siedlungsstrukturen übertragen. Auf diese Weise wird ein einfaches Modell entwickelt, das die Musterbildung in Städten globalen Südens abbildet (Abschnitt 3.2). Das Modell wird daraufhin einerseits mithilfe einer linearen Stabilitätsanalyse (Abschnitt 3.3) untersucht, dessen nichtlineares Verhalten andererseits mithilfe von Simulationen abgebildet (Abschnitt 3.4) und zuletzt interpretiert (Abschnitt 3.5).

3.1 Grundlegende Arbeiten

Wie entsteht aus Materie Leben und wie lassen sich die dabei ablaufenden Prozesse mit den bekannten physikalischen Grundprinzipien, wie dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik, vereinbaren? Nachdem sich die naturwissenschaftliche Forschung zu Beginn des 20. Jahrhunderts vor allem mit der Struktur und dem Aufbau der Materie auseinandersetzte, wendete sie sich in der Mitte des 20. Jahrhunderts den oben beschriebenen biologischen

¹ 1749-1832, Deutscher Dichter und Denker, Zitat aus: *Faust, II. Teil*, 1831. Inspiration zu diesem Zitat bei Ilya Prigogine, *Vom Sein und Werden*. [162]

Fragestellungen zu². Die in diesem Kontext entstandenen Forschungsarbeiten haben das Verständnis der belebten Natur stark erweitert und ihre Grundzüge können anschaulich in den Arbeiten und Konzepten dreier herausragender Persönlichkeiten und Wissenschaftler nachvollzogen werden: Erwin Schrödinger, Ilya Prigogine und Alan Turing.

Erwin Schrödinger

Besonders eindrücklich, und für ein breites Publikum verständlich, stellt Erwin Schrödinger³ in einer 1943 an der Universität von Dublin gehaltenen Vorlesungsreihe⁴ die Frage: *Was ist Leben?* Unter Anwendung grundlegender physikalischer Modelle analysiert er unterschiedliche Aspekte der Funktion und der Entstehung biologischer Organismen. Leitend ist für ihn dabei die Suche nach der Herkunft von Ordnung in lebenden Systemen. Der Begriff der Ordnung wird im Kontext der Physik seit der grundlegenden Arbeit von Rudolf Clausius⁵ verwendet. Ihr quantitative Beschreibung ist durch folgende, auf Ludwig Boltzmann⁶ zurückgehende Gleichung

$$S = k_B \log(\Omega) \quad (3.1)$$

eng mit dem Begriff der Entropie S verknüpft. Dabei beschreibt k_B die Boltzmannkonstante und Ω wird als Maß für die *Unordnung* betrachtet⁷. Je höher die Unordnung Ω in einem System, desto höher ist dessen Entropie⁸ und desto höher ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieses Zustands des Systems. Im 2. Hauptsatz der Thermodynamik⁹, einem der Grundaxiome der Physik, wird die Erfahrung beschrieben, dass jedes abgeschlossene System im

² SCHRÖDINGER, *Was ist Leben?*, ([191], 2011, Vorwort von E. Fischer)

³ 1887-1961, Nobelpreisträger für Physik 1933

⁴ SCHRÖDINGER, *Was ist Leben?*, ([191], 2011)

⁵ CLAUSIUS, „Ueber verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie“, ([32], 1865, Clausius spricht von *Anordnungen*.)

⁶ BOLTZMANN, „Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze des mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung, respective den Sätzen über das Wärmegleichgewicht.“, ([18], 1877)

⁷ Mit Ω wird die Anzahl der möglichen Mikrozustände, die ein gegebener Makrozustand eines Systems einnehmen kann, beschrieben. Schrödinger versteht Ω und die Entropie deshalb als Maß für die Unordnung eines Systems. [191]

⁸ Die hier dargestellte Interpretation der Entropie greift auf die Ansicht Schrödingers [191] zurück, wird aber in der neueren Literatur auch kritisiert. Zu einer detaillierten Analyse der Definition der Entropie sei deshalb auf weiterführende Arbeiten [122] verwiesen.

⁹ Dieser wurde in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts von Sadi Carnot und Rudolf Clausius erstmals in der heute bekannten Form beschrieben. Siehe [90]

Laufe der Zeit einen Zustand geringerer Ordnung und damit höherer Entropie anstrebt. Diese durch folgende Ungleichung

$$\frac{dS}{d\tilde{t}} \geq 0 \quad (3.2)$$

beschriebene Erfahrung, dass die Entropie eines abgeschlossenen Systems mit fortlaufender Zeit \tilde{t} nie abnimmt, kann an vielfältigen Beispielen nachvollzogen werden. So weist das heiße Wasser in der Nähe eines eingetauchten Teebeutels eine im Vergleich zur Umgebung höhere Konzentration an denen im Teebeutel enthaltenen Inhaltsstoffen auf (Abbildung 3.1, oben)¹⁰.

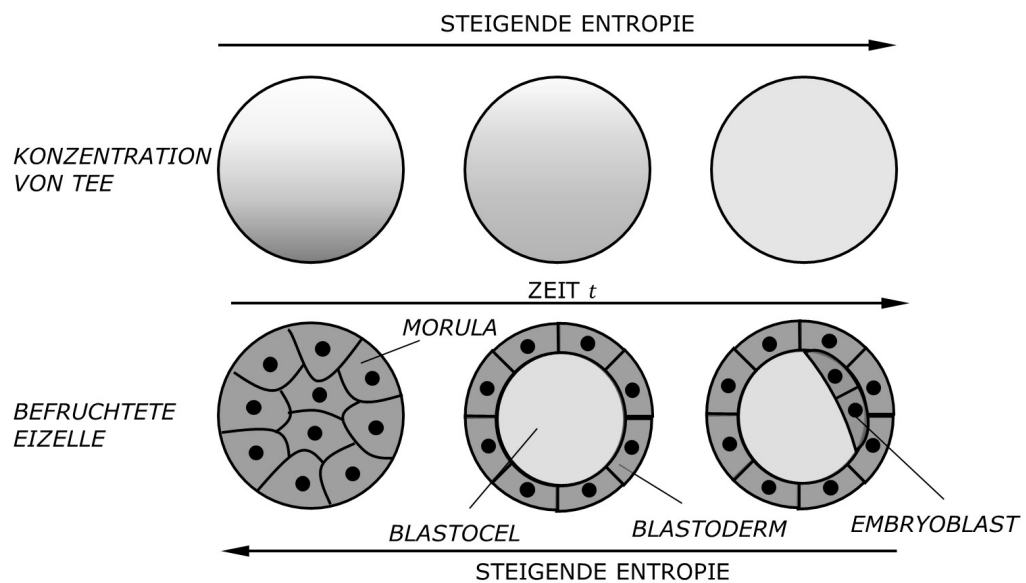


Abbildung 3.1 – In der oberen Reihe ist eine schematische Darstellung des zeitlichen Verlaufs der räumlichen Verteilung der Inhaltsstoffe eines Teebeutels in einem Glas zu sehen. Die dunklen Bereiche repräsentieren eine hohe Konzentration an Inhaltsstoffen, die hellen Bereiche eine niedrige. Unten ist schematisch die zeitliche Entwicklung einer befruchteten Eizelle dargestellt.

Dieser Zustand kann durch eine bestimmte Entropie S_1 beschrieben werden. Durch den Prozess der Diffusion verteilen sich die Inhaltsstoffe entsprechend dem Fick'schen Gesetz entlang ihrer Konzentrationsgradienten mit der Zeit gleichmäßig im Glas¹¹, bis schlussendlich ein räumlich homogener Zustand er-

¹⁰Eine konzeptionell ähnliche Darstellung findet sich bei [79].

¹¹FICK, „Ueber diffusion“, ([47], 1855)

reicht wird¹². Dieser spätere Zustand des Systems besitzt eine höhere Entropie S_2 als der Anfangszustand und hat eine höhere Auftrittswahrscheinlichkeit, als der Ursprungszustand S_1 .

Die Beobachtung der zeitlichen Entwicklung von Lebewesen scheint dieser Erfahrung zu widersprechen (vgl. Abbildung 3.1, unten): Im Laufe der Embryonalentwicklung biologischer Organismen, wie z.B. bei Säugetieren, teilen sich die Zellen nach der Befruchtung zunächst gleichmäßig. Der dabei entstehende Zellhaufen wird *Morula* genannt. Im Anschluss entsteht daraus ein durch eine homogene Zellschicht, dem *Blastoderm*, umgebener flüssigkeitsgefüllter Hohlraum, dem *Blastocel*. Die Symmetrie dieser Struktur wird im Folgenden gebrochen: An einer bestimmten Stelle des Blastoderms bildet sich nach einiger Zeit der *Embryoblast* aus, aus dem sich dann der eigentliche Embryo entwickelt. Die zunächst homogene Verteilung von Zellen wird damit heterogen. An dieser^{13,14} und auch an anderen Stellen¹⁵ wird im zeitlichen Verlauf der Embryonalentwicklung die Symmetrie der Struktur gebrochen. Die Ordnung des Systems nimmt mit der Zeit zu, während die Entropie abnimmt. Schrödinger zeigt Ansätze auf, um diesen scheinbaren Widerspruch zu dem oben bereits erwähnten 2. Hauptsatz der Thermodynamik auf unterschiedlichen Ebenen aufzulösen: Er stellt einerseits (i) die These auf, dass die Informationen über die Ontogenese¹⁶ des jeweiligen Organismus in einer Art Genmaterial übertragen werden müsste. Der Organismus greift somit auf einen Bauplan zurück, um seine Struktur auszubilden. Obwohl zu diesem Zeitpunkt die Doppelhelixstruktur des Erbmaterials noch nicht bekannt war, stellt Schrödinger in seiner Vorlesung grundlegende Überlegungen¹⁷ über deren Aufbau an, die sich im Nachhinein als zutreffend erwiesen haben. Diese Überlegungen waren mit ein Grund dafür, einen der Entdecker der Doppelhelixstruktur, James Watson, für die Thematik der Molekularbiologie zu begeistern¹⁷. Die Vorlesung Schrödingers kann damit als Musterbeispiel dafür angesehen werden, wie eine fachfremde Sichtweise auf eine bestimmte Fragestellung den wissenschaftlichen Diskurs anregen kann.

Andererseits (ii) bearbeitet Schrödinger die Frage nach der Ordnung in biologischen Organismen auf einer allgemeineren Ebene, in dem er aufzeigt,

¹²Diese Aussage gilt unter der Annahme, dass sich das Fluid nicht bewegt und der Konzentrationsausgleich nur über den Prozess der Diffusion stattfindet.

¹³CHEN U. A., „Tracing the origin of heterogeneity and symmetry breaking in the early mammalian embryo“, ([29], 2018)

¹⁴SHAHBAZI, SIGGIA UND ZERNICKA-GOETZ, „Self-organization of stem cells into embryos“, ([193], 2019)

¹⁵PRIGOGINE UND STENGERS, *Dialog mit der Natur*, ([163], 1993, S. 135ff.)

¹⁶Unter *Ontogenese* wird die zeitliche Entwicklung eines Organismus verstanden.

¹⁷SCHRÖDINGER, *Was ist Leben?*, ([191], 2011)

dass lebende Organismen durch ihre *Offenheit* gegenüber der Umwelt geprägt sind. Im Gegensatz zu abgeschlossenen Systemen, in denen die Entropie monoton mit der Zeit ansteigt, können offene Systeme durch den ständigen Austausch von Energie und Materie mit ihrer Umgebung ihre Entropie auf einem niedrigen Niveau halten. Die oben beschriebene Erfahrung, dass die Entropie innerhalb eines geschlossenen System zunimmt, wird durch lebende Organismen also nicht verletzt. Vielmehr noch ist die Offenheit und die Reaktion auf ihre Umgebung eine Grundvoraussetzung des Lebens an sich. Dieser stetige Austausch führt dazu, dass sich lebende Organismen immer fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht befinden¹⁸.

Ilya Prigogine

Systeme außerhalb des thermodynamischen Gleichgewichts sind Forschungsgegenstand der Nichtgleichgewichtsthermodynamik¹⁹. Der bekannteste Vertreter dieses Forschungszweigs ist der in Russland geborene und nach Belgien immigrierte Chemiker Ilya Prigogine²⁰. Auch er beschäftigte sich mit der Frage nach Ordnung²¹ und untersuchte diese in thermodynamischen Systemen außerhalb des Gleichgewichtszustands. Prigogine analysiert Strukturen, die unter bestimmten Voraussetzungen in offenen thermodynamischen Systemen fernab des Gleichgewichts entstehen können. Diese bezeichnet er als *dissipative Strukturen*^{22,23}. Ein bekanntes Beispiel für eine solche dissipative Struktur ist die sogenannte Rayleigh-Bernard-Konvektion²⁴. Bei diesem Phänomen wird ein Fluid betrachtet, das sich zwischen zwei Platten unterschiedlicher Temperatur befindet. Während der Wärmestrom bei geringer Temperaturdifferenz aufgrund von Wärmeleitung durch das Fluid übertragen wird, ändert das System bei Überschreiten einer kritischen Temperaturdifferenz qualitativ seinen Charakter. Es bilden sich hexagonale Strömungsstrukturen aus, in denen die Wärme durch Konvektion übertragen wird. Diese Strukturen sind gegenüber kleineren Störungen unempfindlich, was als Nichtgleichgewichtstabilität bezeichnet wird.

Die Bedingungen für die Ausbildung solcher dissipativer Strukturen sind (i) die Offenheit des Systems, (ii) ihr Operieren fernab des thermodynami-

¹⁸PRIGOGINE UND STENGERS, *Dialog mit der Natur*, ([163], 1993)

¹⁹PRIGOGINE UND GRIESE, *Vom Sein zum Werden*, ([162], 1992)

²⁰1917-2003, Nobelpreis für Chemie 1977

²¹PRIGOGINE, „Time, Structure, and Fluctuations“, ([161], 1978)

²²GOLDBETER, „Dissipative structures and biological rhythms“, ([67], 2017)

²³GOLDBETER, „Dissipative structures in biological systems“, ([68], 2018)

²⁴BÉNARD, *Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide propageant de la chaleur par convection: en régime permanent*, ([13], 1901)

schen Gleichgewichts und (iii) ihr charakteristisches nicht-lineares und durch Evolutionsgleichungen beschreibbares Verhalten²³. Diese Strukturen werden als selbstorganisierend bezeichnet²⁵, was bedeutet, dass die entstehenden Muster dem System nicht von äußeren Kräften oder Prozessen aufgeprägt werden, sondern im Systemverhalten selbst begründet sind. Diese Art von Strukturen können zeitlicher Natur sein und sich in Oszillationen ausdrücken, sie können räumlich stationäre Muster ausprägen oder sich im Raum fortbewegende Wellen beschreiben.

Der Fokus von Prigogines Forschung lag zunächst auf der Untersuchung anhaltender Schwingungen in chemischen bzw. biologischen Systemen²³. Diesen weitete er in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts auf räumliche und räumlich-zeitliche Muster aus, wobei er von einer bahnbrechenden Arbeit²⁶ Alan Turings inspiriert wurde²⁷.

Alan Turing

Alan Turing²⁸, bekannt durch die Entwicklung grundlegender Konzepte im Bereich der Informatik (Turing-Maschine²⁹) und speziell zur Beurteilung künstlicher Intelligenz (Turing-Test³⁰), hat sich in seinen letzten Lebensjahren intensiv mit Fragestellungen aus der Biologie auseinandergesetzt.

Besonders bekannt ist seine Arbeit *The Chemical Basis of Morphogenesis*²⁶. Diese motiviert er mit der bereits oben erwähnten Embryonalentwicklung eines Fötus und der damit verbundenen Frage, wie ein zunächst nahezu homogener Ring aus Zellen heterogen wird und damit eine zunächst symmetrische Struktur ohne äußere Einflüsse Asymmetrien ausbilden kann. Zur Beantwortung dieser Frage entwickelt Turing ein Modell, in dem zwei sogenannte Morphogene³¹ durch die Zellen diffundieren und miteinander reagieren können.

Turing zeigt unter Verwendung mathematischer Methoden, wie die Interaktion aus Reaktions- und Diffusionsprozessen ausreicht, um eine zunächst homogene

²⁵KONDEPUDI UND PRIGOGINE, *Modern Thermodynamics*, ([104], 1998)

²⁶TURING, „The Chemical Basis of Morphogenesis“, ([220], 1952)

²⁷GOLDBETER, „Dissipative structures in biological systems“, ([68], 2018)

²⁸1912-1954, Mathematiker, Logiker und Kryptoanalytiker, der im zweiten Weltkrieg maßgeblich an der Entschlüsselung der ENIGMA beteiligt war, die vom deutschen Reich für die Verschlüsselung von Funkprüchen verwendet wurde [41].

²⁹TURING, „On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem“, ([219], 1937)

³⁰TURING, „Computing Machinery and Intelligence“, ([218], 1950)

³¹Der Begriff *Morphogen* kann als *Formschaffer* verstanden werden und bezeichnet sogenannte Signalmoleküle [220].

stabile Konzentrationsverteilung zweier Morphogene durch die Anwesenheit von Diffusion instabil werden zu lassen und sich dadurch Muster ausbilden. Die Bedingung dafür ist, dass eines der beiden Morphogene schneller durch das Gewebe diffundiert, als das andere. Während Diffusion vor Turings Arbeit als stabilisierender Prozess in Systemen bekannt war, wie am Beispiel des Teebeutels deutlich wurde, zeigt er, dass sie unter bestimmten Umständen auch zu einer Instabilität des Systems führen kann. Dieser Vorgang wird deshalb als diffusionsgetriebene Instabilität, diffusionsgetriebene Musterbildung oder auch als *Turing-Instabilität* bezeichnet. Die dabei entstehenden *Turing-Muster* sind ein weiteres Beispiel für dissipative Strukturen²⁷. Grundsätzlich ist dabei die Erkenntnis, dass sich das Verhalten eines solchen Systems durch die Änderungen des Diffusionsverhaltens eines der Morphogene über einen bestimmten Grenzwert hinaus nicht nur graduell, sondern qualitativ ändert. Der zugrundeliegende Mechanismus kann anhand von Abbildung 3.2 nachvollzogen werden.

Die beiden Morphogene werden hier als Substrat und Aktivator bezeichnet und ihre Konzentrationen sind miteinander gekoppelt. Die Konzentration des Aktivators erhöht sich unter Verbrauch des Substrats. Ist die Diffusion beider Morphogene nicht vorhanden oder sind die Diffusionswerte identisch, pendelt sich das System immer wieder in den dargestellten Zustand (i) ein. Unterscheidet sich die Diffusion der beiden Stoffe hinreichend voneinander, beginnen sich durch den selbstverstärkenden Prozess Konzentrationsspitzen auszubilden (ii). Da der Aktivator langsamer als das Substrat diffundiert, können die Konzentrationsspitzen nicht ausreichend schnell abgebaut werden, wie das Substrat von außen dem Konzentrationsgradienten entlang einströmt (iii). In einer autokatalytischen Reaktion und unter Verbrauch des Substrats wachsen die Konzentrationsspitzen an, wodurch ein regelmäßiges Muster entsteht (iv).

Überschreitet die Konzentration eines dieser Moleküle einen bestimmten Schwellwert ϑ , wird ein Mechanismus gestartet, der die Herausbildung einer Inhomogenität, wie z.B. dem oben beschriebenen Embryoblast, initiiert.

Auch wenn sich in den Jahrzehnten nach ihrer Veröffentlichung das Verständnis der zugrundeliegenden Prozesse in der Embryonalentwicklung stark erweitert hat^{32,33,34}, wird die Arbeit von Turing als deren Startpunkt angesehen und weiterhin die Theorie untersucht, nach der die Konzentrationsverteilung von

³²GREEN UND SHARPE, „Positional information and reaction-diffusion“, ([71], 2015)

³³CHEN U. A., „Tracing the origin of heterogeneity and symmetry breaking in the early mammalian embryo“, ([29], 2018)

³⁴SHAHBAZI, SIGGIA UND ZERNICKA-GOETZ, „Self-organization of stem cells into embryos“, ([193], 2019)

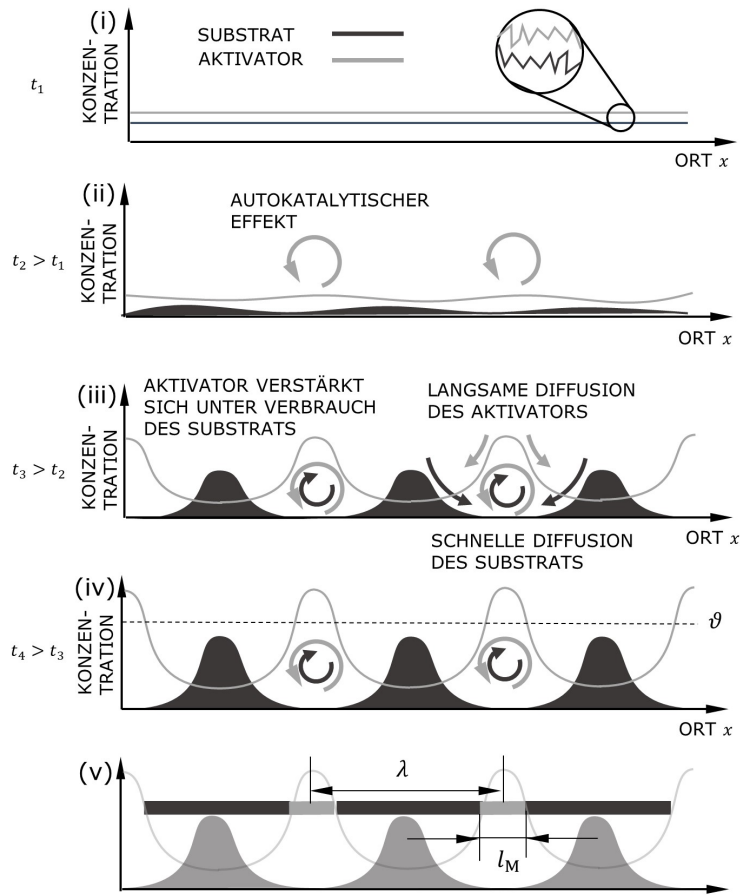


Abbildung 3.2 – Schematische Darstellung der Entwicklung einer Turing-Instabilität nach [71].

Morphogenen³⁵ innerhalb des Blastoderms die Ursache für den Aufbruch der Symmetrie der frühen Eizelle ist.

In späteren Arbeiten³⁶ wird der von Turing beschriebene Mechanismus angewandt, um die Entstehung regelmäßiger Strukturen auf Tierfellen zu erklären. Es wird angenommen³⁶, dass Melanozyten, die zur Produktion des Farbstoffs Melanin, der für die Färbung von Haaren oder Haut zuständig ist, zur Aktivierung ihrer Tätigkeit eines Morphogens bedürfen. Übersteigt die Konzentration dieses Morphogens einen Schwellwert, wird die Melaninproduktion angeregt und das Fell des Tieres färbt sich an dieser Stelle und

³⁵Chen und andere [29] interpretieren diese Morphogene im Kontext moderner Biologie beispielsweise als RNA.

³⁶MURRAY, *Mathematical Biology II - Spatial Models and Biomedical Applications*, ([145], 2003)

damit in einem periodischen Abstand. Das wiederum führt zu typischen Fellmustern regelmäßiger Größe, wie sie beispielsweise bei Zebras beobachtet werden können. Das Prinzip kann in Abbildung 3.2, (v) nachvollzogen werden. Die resultierenden Muster weisen einen Abstand λ voneinander auf und besitzen die Größe l_M . Die regelmäßigen Muster auf Tierfellen werden dabei nicht als Turing-Muster an sich betrachtet, sondern reflektieren die Konzentrationsverteilung der zur Aktivierung der Melanozyten notwendigen Substanz zu einem bestimmten Zeitpunkt in der embryonalen Entwicklung. Diese Grenzkonzentration ϑ funktioniert im Fall des Tierfells als eine Art Schalter.

Nachweise und Anwendungen von Turing-Instabilitäten

Diese zunächst theoretischen Überlegungen Turings wurden in den folgenden Jahren detaillierter untersucht. Der erste experimentelle Nachweis eines Turing-Musters in einem chemischen System wurde im Jahr 1990 erbracht³⁷. Dieses und ein weiteres System blieben lange Zeit die einzigen experimentellen Nachweise, bis Horvath und andere³⁸ eine Methode präsentierten, um experimentelle Nachweise für eine Turing-Instabilität führen zu können. In biologischen Systemen wiederum zeigen Raspopovic und andere³⁹, dass die Anordnung von Fingern in der Embryonalentwicklung das Resultat einer Turing-Instabilität ist.

Ferner wurde das Konzept der Turing-Instabilität auf die Musterbildung in der Interaktion von lebenden Organismen übertragen werden. Theraulax und andere⁴⁰ zeigen in einem Laborexperiment, dass die Anordnung von Ameisenkadavern durch eine Turing-Instabilität abgebildet werden kann. Karig und andere⁴¹ übertragen das um eine stochastische Beschreibung erweiterte Konzept auf die Musterbildung in synthetischen Bakterienkolonien.

Neben dieser Art von Nachweisen, in denen die beteiligten Morphogene identifiziert werden und der Prozess der Musterbildung als experimentell bestätigt betrachtet wird, ist eine Vielzahl von weiteren Modellen bekannt, die in der Natur vorkommenden Muster durch Turing-Instabilitäten beschreiben. Gierer

³⁷CASTETS U. A., „Experimental evidence of a sustained standing Turing-type nonequilibrium chemical pattern“, ([27], 1990)

³⁸HORVATH, SZALAI UND DE KEPPEL, „An Experimental Design Method Leading to Chemical Turing Patterns“, ([91], 2009)

³⁹RASPOPOVIC U. A., „Digit patterning is controlled by a Bmp-Sox9-Wnt Turing network modulated by morphogen gradients“, ([171], 2014)

⁴⁰THERAULAZ U. A., „Spatial patterns in ant colonies“, ([211], 2002)

⁴¹KARIG U. A., „Stochastic Turing patterns in a synthetic bacterial population“, ([97], 2018)

und Meinhardt⁴² erklären dadurch die Musterbildung auf Schneckengehäusen und Murray⁴³ wendet das Modell zur Beschreibung der Musterbildung auf Tierfellen an, ohne die beteiligten Morphogene experimentell nachgewiesen zu haben.

Daneben wird das Konzept der Turing-Instabilität auch auf größere Skalen ökologischer Systeme übertragen, um beispielsweise die regelmäßige Anordnung von Termitenhügeln⁴⁴ zu beschreiben. In einer wirtschaftswissenschaftlichen Arbeit⁴⁵ wendet Krugman⁴⁶ das Modell auf die Anordnung von Wirtschaftsstandorten in einer Region an und beschreibt diese durch eine Interaktion in Transportwegen mit einer Turing-Instabilität.

Zuletzt haben unterschiedliche Forschende damit begonnen, auch Prozesse in urbanen Systemen mithilfe dieser Modelle zu beschreiben. Medda und andere⁴⁷ verbinden die Entstehung urbaner Form ebenfalls mit Transport. Sie beschreiben dabei externe und private Transportkosten in einer Stadt als Morphogene, die miteinander interagieren. Levashova und andere⁴⁸ wiederum stellen Urbanisierungsprozesse durch eine Interaktion zwischen anthropogenen und natürlichen Prozessen in Form einer Turing-Instabilität dar.

Dabei ist festzuhalten, dass je größer die Skalen der betrachteten Systeme sind, desto eher ist der Vergleich von Modell und beobachtetem Muster rein qualitativer Art. Der Nachweis, dass der formbildende Prozess durch einen Turing-Mechanismus beschrieben werden kann, ist auf Grund der vielfältigen Wechselwirkungen des Systems mit seiner Umgebung häufig nicht eindeutig zu führen⁴⁴.

⁴²GIERER UND MEINHARDT, „A theory of biological pattern formation“, ([63], 1972)

⁴³MURRAY, *Mathematical Biology II - Spatial Models and Biomedical Applications*, ([145], 2003)

⁴⁴PRINGLE UND TARNITA, „Spatial Self-Organization of Ecosystems“, ([164], 2017)

⁴⁵KRUGMAN, *The self-organizing economy*, ([114], 1996)

⁴⁶Nobelpreisträger für Wirtschaftswissenschaften 2008. Er ist für seine Arbeiten der Erweiterung wirtschaftswissenschaftlicher Modelle um eine räumliche Komponente geehrt worden (Spatial Economy).

⁴⁷MEDDA, NIJKAMP UND RIETVELD, „A morphogenetic perspective on spatial complexity“, ([138], 2009)

⁴⁸LEVASHOVA U. A., „A Spatio-Temporal Autowave Model of Shanghai Territory Development“, ([121], 2019)

3.2 Beschreibung informeller Siedlungen auf Grundlage einer Turing-Instabilität

Die Zusammenführung der genannten Vorarbeiten ((i) grundlegende Arbeiten zur physikalischen Beschreibung biologischer Prozesse, (ii) zur Nichtgleichgewichtsthermodynamik offener Systeme, (iii) die mathematische Beschreibung der Morphogenese von Organismen, sowie (iv) die im vorherigen Kapitel 2 beschriebenen Tendenz, Städte mit Organismen zu vergleichen) in der Abduktion führt zu der Modellhypothese, die Herausbildung urbaner informeller Siedlungen durch ein Modell der diffusionsgetriebenen Instabilität zu beschreiben. In dieser Arbeit werden informelle Siedlungen damit als dissipative Strukturen behandelt. Zwar sind auch andere Arbeiten bekannt, die das Konzept der dissipativen Strukturen auf Städte übertragen⁴⁹, diese beziehen sich aber auf inter-urbane Systeme und betrachten keine intra-urbanen Siedlungsverteilungen, wie das folgende Modell.

In den Technikwissenschaften ist es üblich, komplexe Prozesse durch möglichst einfache⁵⁰ mathematische Modelle zu beschreiben⁵¹, um deren grundsätzliches Verhalten abzubilden. Unter Verwendung der in Kapitel 3.1. dargestellten Erkenntnisse wird im Folgenden ein Modell⁵² auf Grundlage einer diffusionsgetriebenen Instabilität nach Turing entwickelt, um die Bildung informeller Siedlungen in Städten des Globalen Südens zu beschreiben. Deren Morphogenese wird dabei durch die Interaktion zweier Bevölkerungsgruppen dargestellt und in einer linearen Stabilitätsanalyse untersucht. Die nun folgenden Ausführungen basieren maßgeblich auf der Veröffentlichung von Pelz, Friesen und Hartig⁵².

Während der Fokus der bisherigen Forschung auf der Analyse und spezifischen Modellierung informeller Siedlungen liegt, wird in dieser Arbeit im Gegensatz dazu ein einfaches und allgemein anwendbares Modell entwickelt. Dieses Modell ergänzt die vorhandenen Arbeiten schafft durch das Zusammenbringen diverser Vorarbeiten aus unterschiedlichen Disziplinen einen neuen Blick auf informelle Siedlungen. Da für spezifische Modelle häufig keine Datenbasis vorliegt, erscheint ein solches Modell lohnenswert, auch wenn dadurch im

⁴⁹P. Allen, ein Schüler von Prigogine hat sich intensiv mit der Frage auseinandergesetzt, inwieweit Städte als dissipative Strukturen verstanden werden können und wie dieses Konzept mit gängigen Theorien der Stadtbildung [4], wie z.B. dem Konzept der zentralen Orte von Christaller [30] kombiniert werden kann.

⁵⁰MAY, „Simple mathematical models with very complicated dynamics“, ([133], 1976)

⁵¹ACATECH, *Technikwissenschaften: Erkennen - Gestalten - Verantworten*, ([1], 2013)

⁵²PELZ, FRIESEN UND HARTIG, „Similar size of slums caused by a Turing instability of migration behavior“, ([157], 2019)

Vergleich zu alternativen Modellen stärkere Annahmen getroffen werden. Eine solche Art von Modellen ist dringend notwendig, um Vorhersagen der Entwicklungen informeller Siedlungen im Kontext der starken Urbanisierung zu machen und damit für die infrastrukturelle Planung eine wesentliche Grundlage.

Modellierung

Die Modellierung beginnt mit einer Einteilung der Bevölkerung in zwei Gruppen ($i = 1, 2$), basierend auf dem Wohlstand der jeweiligen Mitglieder dieser Gruppen. Während die Mitglieder der ersten Gruppe ($i = 1$) einen geringeren Wohlstand haben und deshalb im Folgenden als *arm* bezeichnet werden, besitzen die Mitglieder der zweiten Gruppe ($i = 2$) einen höheren Wohlstand und werden als *reich* bezeichnet⁵³.

Die Anzahl von Personen an einem spezifischen Ort \tilde{x}_j und zu einer spezifischen Zeit \tilde{t} wird durch das Bevölkerungsdichtefeld $\tilde{u}_i(\tilde{x}_j, \tilde{t})$ beschrieben⁵⁴. Daraus resultiert, dass die Anzahl der Bewohner N_i einer der beiden Gruppen i in einem begrenzten Gebiet A innerhalb einer Stadt durch den Zusammenhang $N_i = \int_A \tilde{u}_i dA$ dargestellt werden kann. Weiterhin wird angenommen, dass die zeitliche Änderung der Anzahl an Bewohnern einer Gruppe $DN_i/D\tilde{t}$ in dem beschriebenen Gebiet durch zwei Arten von Migration beschrieben werden kann:

$$\frac{DN_i}{D\tilde{t}} = \frac{DN_{i,FM}}{D\tilde{t}} + \frac{DN_{i,KM}}{D\tilde{t}}. \quad (3.3)$$

Die sogenannte *Fernmigration*⁵⁵ $DN_{i,FM}/D\tilde{t} := \int_A \hat{U} \hat{R} f_i(u_j) dA$ ist die erste Art der Migration und stellt das Produkt aus dimensionslosem Reaktionsterm $f_i(u_j)$ und der Reaktionsrate $\hat{U} \hat{R}$ dar. Während \hat{U} die Dimension einer Bevölkerungsdichte aufweist, ist \hat{R} eine Rate mit der Dimension pro Zeit. Um Städte unterschiedlicher Bevölkerungsdichten miteinander vergleichen

⁵³In der Verwendung dieser Bezeichnungen sei auf die in Kapitel 2 aufgeführten Anmerkungen und die Kritik an dichotomen Klassifizierungen verwiesen.

⁵⁴Obwohl der Fokus der in den Grundlagen (Kap. 2) auf der Analyse der physischen Struktur liegt, wird in der folgenden Modellierung die Bevölkerungsdichte betrachtet. Dies ist in dem Umstand begründet, dass die Siedlungsstrukturen einfacher zu erfassen sind, deren Entstehung auf menschlichem Handeln gründet und dieses somit die Ursache der Entstehung dieser Siedlungen ist. Am Ende des Kapitels wird erläutert, wie in diesem Modell von der modellierten Bevölkerungsdichte auf die Bebauungsstruktur geschlossen werden kann.

⁵⁵engl. *long-distance migration*

zu können, wird die örtlich abhängige Bevölkerungsdichte $\tilde{u}_i(\tilde{x}_j, \tilde{t})$ mit der maximalen Bevölkerungsdichte \hat{U} der jeweils betrachteten Stadt entdimensioniert $u_i := \tilde{u}_i/\hat{U}$. Die Fernmigration beschreibt die Anzahl an Personen, die in einem definierten Zeitintervall von außen in die Stadt ziehen, in ihr geboren werden oder versterben.

Die als *Kurzstreckenmigration*⁵⁶ $DN_{i,KM}/D\tilde{t} := -\oint_C \vec{J}_i \cdot \vec{n} dC$ definierte zweite Art der Migration stellt den Strom an Personen dar, der in Abhängigkeit des Verlaufs der Bevölkerungsdichte über die Systemgrenze C des betrachteten Gebietes der Fläche A fließt. In Anlehnung an das erste Fick'sche Gesetz⁵⁷ wird dieser Strom durch $\vec{J}_i = -D_i \nabla \tilde{u}_i$ mit jeweils konstanten Diffusionskoeffizienten D_1 und D_2 für die *arme* und *reiche* Bevölkerung dargestellt.

Dabei wird die Kreuzdiffusion zwischen den beiden Bevölkerungsgruppen vernachlässigt. Es wird weiterhin angenommen, dass keine *Kurzstreckenmigration* über die Stadtgrenze hinweg stattfinden kann. Dies wird als Neumann-Randbedingung bezeichnet. Ziehen Personen von außen in die Stadt, wird dieser Zuzug durch die *Fernmigration* abgebildet. Damit wird die zeitliche Änderung an Personen in einem bestimmten Gebiet A durch das gekoppelte Gleichungssystem

$$\begin{aligned} \frac{DN_1}{D\tilde{t}} &= \frac{\partial}{\partial \tilde{t}} \int_A \tilde{u}_1 dA = \int_A \hat{U} \hat{R} f_1(u_1, u_2) dA - \oint_C \vec{J}_1 \cdot \vec{n} dC, \\ \frac{DN_2}{D\tilde{t}} &= \frac{\partial}{\partial \tilde{t}} \int_A \tilde{u}_2 dA = \int_A \hat{U} \hat{R} f_2(u_1, u_2) dA - \oint_C \vec{J}_2 \cdot \vec{n} dC \end{aligned} \quad (3.4)$$

beschrieben. Nach Anwendung des Gauß'schen Integralsatzes wird das Gleichungssystem in folgender Form und damit unabhängig von der betrachteten Fläche notiert

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial \tilde{t}} &= \hat{U} \hat{R} f_1(u_1, u_2) + D_1 \Delta \tilde{u}_1, \\ \frac{\partial \tilde{u}_2}{\partial \tilde{t}} &= \hat{U} \hat{R} f_2(u_1, u_2) + D_2 \Delta \tilde{u}_2. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Die Entdimensionierung $t := \hat{R}\tilde{t}$, $x_j := \tilde{x}_j \sqrt{\hat{R}/D_1}$ führt zu folgender dimensionslosen Reaktions-Diffusions-Gleichung

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = f_i(u_j) + d_{ij} \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_k \partial x_k}, (d_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & d \end{pmatrix}, \quad (3.6)$$

⁵⁶engl. *short-distance migration*

⁵⁷FICK, „Ueber diffusion“, ([47], 1855)

mit der Diffusionszahl $d := D_2/D_1$. Es sei erwähnt, dass die Entdimensionierung des Systems, wie auch in anderen Fällen der Dimensionsanalyse⁵⁸, nicht eindeutig ist, sondern auf unterschiedliche Weise durchgeführt werden kann. Anstatt die Länge im System, wie oben dargestellt, mit dem Quotienten aus Reaktionsrate \hat{R} und Diffusionskoeffizienten D_1 zu entdimensionieren, könnte diese auch über die Gebietslänge L der jeweils betrachteten Stadt entdimensioniert werden⁵⁹. Dies würde allerdings in einem zusätzlichen dimensionlosen Parameter resultieren, der in der Literatur⁶⁰ als $\gamma := D_1/\hat{R}L^2$ definiert wird⁶¹. Um die Bedingungen zu bestimmen, unter denen sich in dem oben dargestellten System Turing-Instabilitäten ausbilden und um deren Funktionsweise detaillierter zu erläutern, wird im Folgenden, angelehnt an die Standardliteratur von Cross und Hohenberg⁶² oder Murray⁶⁰, eine lineare Stabilitätsanalyse des Systems durchgeführt.

3.3 Lineare Stabilitätsanalyse

Zunächst wird das System der beiden Bevölkerungsdichten in Abwesenheit von Diffusion $d_{ij} = 0$, die in diesem Modell als Kurzstreckenmigration bezeichnet wird, betrachtet. Das Gleichungssystem (3.6) wird mit $u_j = U_j + \delta u_j$ linearisiert, wobei U_j die homogene Lösung von $f_i(U_j) = 0$ darstellt. Um das Verhalten des Systems gegenüber kleinen Störungen zu untersuchen, wird das Gleichungssystem mit dem Ansatz $\delta u_j = \mathcal{R}[\delta \hat{u}_j \exp(\sigma t + i k_k x_k)]$ angeregt, in dem σ die Wachstumsrate, und k_k die Wellenzahlen darstellen. i ist dabei die imaginäre Einheit, die aus $i^2 = -1$ resultiert und der Operator \mathcal{R} liefert den Realteil der Anregung.

Es ergibt sich folgendes Eigenwertproblem $(\sigma \delta_{ij} - a_{ij}) \delta \hat{u}_j = 0$, mit der Jakobi-Matrix $(a_{ij})_{2,2} := (\partial f_i / \partial u_j)_{2,2}$ und dem Kroneckerdelta δ_{ij} . Die daraus resultierende Gleichung $\sigma^2 - a_{ii}\sigma + \det(a_{ij})_{2,2} = 0$ führt zu den beiden folgenden Eigenwerten $2\sigma_{1,2} = a_{ii} \pm \sqrt{a_{ii}^2 - 4 \det(a_{ij})_{2,2}}$.

Das System der beiden dimensionslosen Bevölkerungsdichten ist stabil, falls

⁵⁸SPURK, *Dimensionsanalyse in der Strömungslehre*, ([202], 2013)

⁵⁹FRIESEN, TESSMANN UND PELZ, „Reaction-diffusion Model Describing the Morphogenesis of Urban Systems in the US“, ([58], 2019)

⁶⁰MURRAY, *Mathematical Biology II - Spatial Models and Biomedical Applications*, ([145], 2003)

⁶¹Während in der folgenden linearen Stabilitätsanalyse (Abschnitt 2.3) der Übersichtlichkeit halber auf γ verzichtet wird, wird der Wert in allen dargestellten Simulationen verwendet. Die dafür verwendete alternative Entdimensionierung findet sich im Anhang A.1 unter Rückgriff auf [84].

⁶²CROSS UND HOHENBERG, „Pattern formation outside of equilibrium“, ([34], 1993)

die Realteile der Eigenwerte $\mathcal{R}(\sigma) < 0$ negativ sind. In diesem Fall wird jede Störung des Systems gedämpft. Der Realteil der Eigenwerte ist nur negativ, wenn die Spur der Jakobi-Matrix $(a_{ij})_{2,2}$ negativ

$$a_{ii} = a_{11} + a_{22} < 0 \quad (3.7)$$

und die Determinante der Jakobi-Matrix

$$\det(a_{ij})_{2,2} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} > 0 \quad (3.8)$$

positiv ist. Um die beiden zuletzt genannten Bedingungen zu erfüllen, müssen entweder jeweils alle Spalten- oder alle Zeileneinträge der Jakobi-Matrix gegenteilige Vorzeichen aufweisen. Dies ist in folgenden vier Fällen gegeben:

$$(a_{ij})_{2,2} = \begin{pmatrix} + & + \\ - & - \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} - & - \\ + & + \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} + & - \\ + & - \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} - & + \\ - & + \end{pmatrix}. \quad (3.9)$$

Während die zu den ersten beiden Jakobi-Matrizen gehörenden Modelle in der Literatur als Aktivator-Substrat Modelle bekannt sind, stellen die letzten beiden Jakobi-Matrizen Aktivator-Inhibitor Modelle dar⁶³.

Die Struktur der durch die ersten beiden Jakobi-Matrizen beschriebenen Gleichungssysteme führt im Fall einer Turing-Instabilität zu gegenphasigen Konzentrationsverläufen, die beiden Letzteren zu gleichphasigen Konzentrationsverläufen. Da angenommen wird, dass die Bevölkerungsdichte *reicher* Bevölkerung in informellen Siedlungen gering, und die Bevölkerungsdichte *armer* Bevölkerung hoch ist, ist ein Modell mit gegenphasigen Verläufen am ehesten zur Beschreibung geeignet. Die Jakobi-Matrix, des in dieser Arbeit untersuchten Aktivator-Substrat-Modells, nimmt folgende Form an

$$(a_{ij})_{2,2} = \begin{pmatrix} a_{11} > 0 & a_{12} > 0 \\ a_{21} < 0 & a_{22} < 0 \end{pmatrix}. \quad (3.10)$$

Die hinteren drei Systeme werden zur Beschreibung der Migrationsbewegung vernachlässigt.

⁶³MEINHARDT, „Turing’s theory of morphogenesis of 1952 and the subsequent discovery of the crucial role of local self-enhancement and long-range inhibition“, ([139], 2012)

3.3.1 Fernmigration

Eine Verteilung von *armer* und *reicher* Bevölkerung ist stabil, wenn die Jakobi-Matrix für ein Aktivator-Substrat Modell die in Gleichung 3.10 dargestellte Form hat. Die Vorzeichen der Jakobi-Matrix werden im Folgenden durch das soziologische Verhalten der beiden Bevölkerungsgruppen interpretiert. Diese sogenannte *Verhaltensmatrix* besteht aus vier Hypothesen zur detaillierten Beschreibung der oben eingeführten *Fernmigration*.

(i) ***Arm zieht Arm an:*** $a_{11} > 0$

Ein Anstieg der Bevölkerungsdichte der *armen* Bevölkerung $u_1(x_j, t)$ an einem speziellen Ort x_j zum Zeitpunkt t resultiert in einem Anstieg an *armer* Bevölkerung, die von außen in die Stadt zieht und sich am Ort x_j nieder lässt. Dadurch wird die sogenannte Landflucht abgebildet, bei der Menschen vom Land in die Stadt ziehen. Diese stellt einen maßgeblichen Faktor für das Wachstum von Städten dar⁶⁴. Die Migrationsbewegungen in die Siedlungsareale, in denen eine hohe Anzahl an *armer* Bevölkerung lebt, kann weiterhin durch informelle Netzwerke begründet werden, durch die rurale Bevölkerung angezogen wird. Saunders spricht davon, dass die bereits oben erwähnten Ankunftsstädte die Funktion eines Zugangsmechanismus⁶⁵ erfüllen, weshalb die migrierenden *Armen* bereits Kontakte in der Stadt haben. Dadurch wachsen Gebiete mit einer hohen Konzentration an *armer* Bevölkerung weiter⁶⁶. Gleichzeitig führt eine steigende Bevölkerungskonzentration an *armer* Bevölkerung auch zu einer erhöhten Geburtenrate⁶⁷. Zuletzt wird in der Literatur beschrieben, dass *arme* Bewohner in Gegenden hoher Bevölkerungsdichte bleiben und nicht in andere Stadtgebiete ziehen^{68,69}. Die Konsequenz ist eine Fernmigration *armer* Bewohner in Siedlungen mit einer hohen Konzentration an *armer* Bevölkerung.

(ii) ***Reich zieht Arm an:*** $a_{12} > 0$

Steigt die Bevölkerungsdichte von *Reichen* $u_2(x_j, t)$, resultiert dies in einem Anstieg von *armen* Personen, die an den Ort x_j ziehen. Die durch die *reiche* Bevölkerung entstehende Konzentration an Kapital

⁶⁴UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS UND POPULATION DIVISION, *World urbanization prospects*, ([223], 2019)

⁶⁵SAUNDERS, *Die neue Völkerwanderung - Arrival City*, ([187], 2013)

⁶⁶TAUBENBÖCK, KRAFF UND WURM, „The morphology of the Arrival City - A global categorization based on literature surveys and remotely sensed data“, ([208], 2018)

⁶⁷COCHRANE, *Fertility and education: What do we really know?*, ([33], 1979)

⁶⁸KRISHNA, „Stuck in Place“, ([113], 2013)

⁶⁹RAINS UND KRISHNA, „Precarious gains“, ([169], 2020)

resultiert in einem Zuzug von *armen* Personen, die in diesen Regionen die Chance für ein besseres Leben sehen^{70,71,72}. Der Grund hierfür liegt in den hohen finanziellen Ressourcen, die durch die *reiche* Bevölkerung zur Verfügung gestellt werden und dadurch Beschäftigungsoptionen für die *arme* Bevölkerung schafft.

(iii) **Arm stößt Reich ab:** $a_{21} < 0$

Gleichzeitig hat ein Anstieg der *armen* Bevölkerung an Punkt x_j zur Folge, dass *reiche* Bevölkerung diesen Ort verlässt. Dies liegt daran, dass die Attraktivität des Ortes für die *reiche* Bevölkerung abnimmt. Bekannte Beispiele für dieses Verhalten finden sich in sogenannten *gated communities*, in denen *Reiche* die Distanz zur *armen* Bevölkerung suchen. Diese Art der Abschottung ist häufig im Globalen Süden anzutreffen⁷³. Auch im Globalen Norden wird das Phänomen beobachtet⁷⁴, dass Reiche die räumliche Nähe zu Armen verhindern wollen.

(iv) **Reich stößt Reich ab:** $a_{22} < 0$

Ein Anstieg *reicher* Bevölkerung $u_2(x_j, t)$ am Ort x_j zur Zeit t kann weiterhin in einer *Fernmigration* der *reichen* Bevölkerung von diesem Ort resultieren. Studien^{75,76} zeigen, dass höheres Einkommen und bessere Bildung mit geringeren Geburtenraten, geringeren Bevölkerungsdichten und größeren Wohnflächen pro Einwohner korrelieren.

Solange die eben beschriebenen Bedingungen erfüllt sind und keine *Kurzstreckenmigration* vorhanden ist $d_{ij} = 0$, existiert eine stabile Verteilung von *armer* und *reicher* Bevölkerung in dem betrachteten Gebiet. Änderungen in der Bevölkerungsdichte einer der beiden Gruppen gleichen sich nach einer gewissen Zeit wieder aus und das System kehrt in seinen stabilen Zustand zurück.

Im Folgenden wird der Einfluss der Diffusion, bzw. der *Kurzstreckenmigration* auf die Stabilität des Systems untersucht. Wie bereits oben angeführt und in

⁷⁰ROY U. A., „The emergence of slums: A contemporary view on simulation models“, ([185], 2014)

⁷¹MAHABIR U. A., „The study of slums as social and physical constructs“, ([130], 2016)

⁷²EZEI U. A., „The history, geography, and sociology of slums and the health problems of people who live in slums“, ([46], 2017)

⁷³LOW, „The edge and the center: Gated communities and the discourse of urban fear“, ([126], 2001)

⁷⁴GLAESER, KAHN UND RAPPAPORT, „Why do the poor live in cities?“, ([66], 2008)

⁷⁵COCHRANE, *Fertility and education: What do we really know?*, ([33], 1979)

⁷⁶ROSLING, ROSLING UND RÖNNLUND, *Factfulness*, ([182], 2019)

der Literatur⁷⁷ häufig beschrieben, kann Diffusion in bestimmten Fällen zu einer Turing-Instabilität⁷⁸ eines vorher stabilen Systems führen.

3.3.2 Kurzstreckenmigration

Aus grundlegenden Arbeiten⁷⁹ der statistischen Mechanik ist bekannt, dass der Diffusionskoeffizient $D_i = k_B T \mu_i$ als Produkt der spezifischen Energie $k_B T$ (Boltzmann Konstante k_B , Temperatur T) und der Mobilität der Teilchen μ_i eines Stoffes beschrieben werden kann: Für ein System konstanter Temperatur T ist das Verhältnis der Diffusionskoeffizienten d somit identisch mit dem Verhältnis ihrer Mobilitäten $d = \mu_2/\mu_1$. Die Mobilität ist definiert durch den Quotienten aus Geschwindigkeit eines Körpers und der zur Aufrechterhaltung dieser Geschwindigkeit benötigten Kraft. In dem hier vorgestellten Modell wird das physikalische Konzept der Mobilität auf Menschen übertragen und bildet deren Möglichkeit ab, sich innerhalb der Stadt zu bewegen. Je höher die Mobilität μ_i , desto einfacher können Menschen ihren Wohnort wechseln. Die Untersuchung der Mobilität von Menschen mithilfe physikalisch motivierter Modelle wird in der Literatur^{80,81,82} häufig durchgeführt und hat zu komplexen Konzepten für deren Beschreibung geführt. Als Startpunkt der hier vorgestellten Modellierung wird das menschliche Bewegungsverhalten durch die Brownsche Molekularbewegung abgebildet und kann deshalb durch die oben eingeführten Diffusionskoeffizienten D_1 und D_2 beschrieben werden. Eine weitere in diesem Modell getroffene Annahme besteht darin, dass die Mobilität mit dem Wohlstand ansteigt. Die Mobilität der *reichen* Bevölkerung ist größer als die Mobilität der *armen* Bevölkerung $\mu_2 > \mu_1$ und folglich $d > 1$. Diese im weiteren Verlauf notwendige Bedingung für die Entstehung von Turing-Mustern ist diskussionswürdig und in der Literatur nicht eindeutig bestimmt. Quigley und Weinberg⁸³ zeigen, dass ein bestimmtes Einkommen nicht mit einer bestimmten Mobilität gleichgesetzt werden kann, eine Erhöhung des Einkommens aber zu einer erhöhten Mobilität führt.

⁷⁷CROSS UND HOHENBERG, „Pattern formation outside of equilibrium“, ([34], 1993)

⁷⁸TURING, „The Chemical Basis of Morphogenesis“, ([220], 1952)

⁷⁹EINSTEIN, „Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen“, ([42], 1905)

⁸⁰GONZÁLEZ, HIDALGO UND BARABÁSI, „Understanding individual human mobility patterns“, ([69], 2008)

⁸¹CASTELLANO, FORTUNATO UND LORETO, „Statistical physics of social dynamics“, ([26], 2009)

⁸²SONG U. A., „Limits of Predictability in Human Mobility“, ([200], 2010)

⁸³QUIGLEY UND WEINBERG, „Intra- Urban Residential Mobility“, ([168], 1977)

Auf diesen Grundannahmen aufbauend, wird nun das Prinzip der diffusionsgetriebenen Instabilität hergeleitet und am Beispiel des oben eingeführten sozialen Systems interpretiert.

Unter der Verwendung von $(b_{ij})_{2,2} := (a_{ij} - d_{ij}k^2)_{2,2}$ kann das Eigenwertproblem bei vorhandener Kurzstreckenmigration $d_{ij} \neq 0$ in folgender Form $(\sigma\delta_{ij} - b_{ij})_{2,2}\delta\hat{u}_j = 0$ notiert werden, wobei $k = \sqrt{k_i k_i}$ die euklidische Länge des Eigenvektors ist. Die beiden resultierenden Eigenwerte sind

$$2\sigma_{1,2} = b_{ii} \pm \sqrt{b_{ii}^2 - 4 \det(b_{ij})_{2,2}}. \quad (3.11)$$

Eine Auslenkung δu_j des Systems um U_j ist weiterhin nur dann stabil, wenn der Realteil des größten Eigenwerts mit der größten Wellenzahl kleiner als Null ist: $\max \mathcal{R}(\sigma(k)) < 0$. Das ist der Fall für

$$b_{ii} = a_{ii} - k^2(1 + d) < 0 \quad (3.12)$$

und

$$\det(b_{ij})_{2,2} = (a_{11} - k^2)(a_{22} - dk^2) - a_{12}a_{21} > 0. \quad (3.13)$$

Da im stabilen Ausgangszustand die Spur $a_{ii} < 0$ ist, ist die Spur der Matrix $b_{ii} = a_{ii} - k^2(1 + d)$ ebenfalls kleiner als Null. Daher kann eine Instabilität des Systems nur durch Verletzung von Gleichung 3.13 erreicht werden. Das Vorzeichen von $\det(b_{ij}) = 0$ wechselt bei $(a_{11} - k^2)(a_{22} - dk^2) - a_{12}a_{21} = 0$, was zu einer vom Quadrat der Wellenzahl k^2 abhängigen quadratischen Funktion führt. Das Minimum der Determinante $\det(b_{ij}) = \det(a_{ij}) - (a_{11}d + a_{22})^2/4d$ wird für

$$k_{\text{dom}}^2 = \frac{1}{2} \left(a_{11} + \frac{a_{22}}{d} \right) \quad (3.14)$$

erreicht.

Daher ist die Determinante $\det(b_{ij})_{2,2}$ negativ für $a_{11}d + a_{22} > 2\sqrt{d \det(a_{ij})_{2,2}}$.

Mit $2\sqrt{d \det(a_{ij})_{2,2}} > 0$ ist eine notwendige Bedingung für eine Turing-Instabilität $a_{11}d + a_{22} > 0$. Die zunächst stabile Verteilung wird deshalb durch

$$\frac{a_{11}}{\mu_1} > -\frac{a_{22}}{\mu_2} \text{ oder } d = \frac{\mu_2}{\mu_1} > -\frac{a_{22}}{a_{11}} \quad (3.15)$$

instabil. Das bedeutet, dass das hier entwickelte Modell eines sozialen System nur dann eine Turing-Instabilität entwickelt, wenn die generalisierte Anziehung a_{11}/μ_1 der *Armen* größer als die generalisierte Abstoßung der *Reichen* $-a_{22}/\mu_2$ ist⁸⁴. Die beiden hier dargestellten Werte setzen die Mechanismen der Kurzstreckenmigration und der Fernnmigration miteinander in Beziehung. Der bis hierhin mathematisch beschriebene Vorgang der diffusionsgetriebenen Instabilität kann im Folgenden mithilfe von Abbildung 3.2 grafisch rekapituliert werden.

Ausgangspunkt ist eine stabile Verteilung der beider Bevölkerungsgruppen mit leichten Fluktuationen. In einem selbstverstärkenden Effekt vermehrt sich die *arme* Bevölkerung (Aktivator) unter Verbrauch der *reichen* Bevölkerung (Substrat). Da die *arme* Bevölkerung eine geringere Mobilität, als die *reiche* aufweist, kann die ansteigende Bevölkerungsdichte nicht durch den Wegzug dieser Personen abgebaut werden. Die *reiche* Bevölkerung weist hingegen eine hohe Mobilität auf und strömt dem Dichtegradienten entlang in das Gebiet ein. Diese erhöhte Mobilität der *reichen* im Vergleich zur *armen* Bevölkerung ist somit die Ursache der diffusionsgetriebenen Instabilität.

3.3.3 Dispersionsrelation, Bifurkation und Modenselektion

Dispersionsrelation

Eine diffusionsgetriebene Instabilität bildet periodische Dichteverteilungen der Wellenlänge $\lambda = 2\pi/k$ aus. Anhand der in Gleichung 3.11 aufgeführten Dispersionsrelation kann dies veranschaulicht werden. Diese setzt die Wachstumsrate σ in Abhängigkeit zum Quadrat der Wellenzahl k^2 , wobei ihr Verlauf abhängig von der Verhaltensmatrix $(a_{ij})_{2,2}$ und der Diffusionszahl d ist. Um eine Dispersionsrelation quantitativ zu untersuchen, ist die Konkretisierung der Reaktionskinetiken f_i notwendig, da in den bisherigen Ausführungen, außer zur Form der Verhaltensmatrix $(a_{ij})_{2,2}$, keine detaillierte Aussage über die Art der Reaktionskinetik f_i getätigt wurde. Da angenommen wird, dass nur ein Aktivator-Substrat Modell zur Beschreibung informeller Siedlungen in Frage kommt, werden die folgenden qualitativen Überlegungen anhand der Aktivator-Substrat Reaktionskinetik nach Schnakenberg⁸⁵ konkretisiert. Die Reaktionskinetik, sowie deren homogene Lösung U_j ist im Anhang

⁸⁴Es sei darauf hingewiesen, dass die Bedingung 3.15 *notwendig* und nicht *hinreichend* für die Entstehung einer Turing-Instabilität ist. Die minimale Diffusionszahl d , ab der sich eine Turing-Instabilität ausbildet, ist in Gleichung 3.17 beschrieben.

⁸⁵SCHNAKENBERG, „Simple chemical reaction systems with limit cycle behaviour“, ([189], 1979)

A.1 aufgeführt. Die Gleichung 3.11 ist unter Verwendung der Kinetik nach Schnakenberg in Abbildung 3.3, (i) für unterschiedliche Diffusionszahlen d dargestellt.

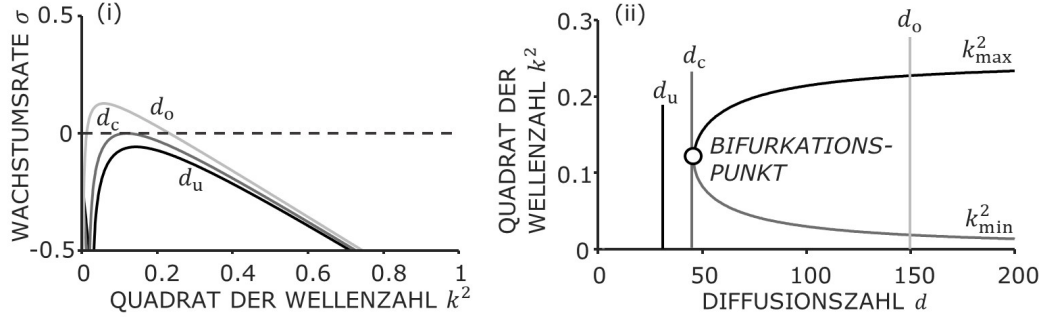


Abbildung 3.3 – Dargestellt ist (i) die Dispersionsrelation für eine Schnakenberg-Kinetik mit drei Diffusionszahlen (d_u, d_c, d_o) und (ii) eine Stabilitätskarte, in der die Wellenzahl in Abhängigkeit von der Diffusionszahl dargestellt ist. d_u beschreibt eine Diffusionszahl kleiner, d_o eine Diffusionszahl größer als d_c . Detaillierte Informationen zu den verwendeten Parametern finden sich in Tabelle A.1.

Liegt d , also das Verhältnis der Diffusionskoeffizienten bzw. Mobilitäten, unterhalb eines kritischen Wertes $d < d_c$, ist die Wachstumsrate $\sigma(k^2) < 0$ für alle Wellenzahlen k negativ und es bilden sich folglich keine Konzentrationspitzen. Dies ändert sich, sobald der kritische Wert $d > d_c$ überschritten wird. Alle Wellenzahlen k , die eine positive Wachstumsrate $\sigma(k^2) > 0$ aufweisen, werden angeregt. Die minimale k_{\min} und maximale Wellenzahl k_{\max} , welche die größten und kleinsten Muster beschreiben, können durch Berechnung der Nullstellen von $\sigma_{1,2} = 0$ ermittelt werden. Dies ist der Fall, wenn die Determinante $\det(b_{ij})_{2,2} = 0$ verschwindet und führt zu

$$k_{\max, \min}^2 = \frac{1}{2} \left(a_{11} + \frac{a_{22}}{d} \right) \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(a_{11} + \frac{a_{22}}{d} \right)^2 - \frac{4 \det(a_{ij})_{2,2}}{d}}. \quad (3.16)$$

Bifurkation

Wird der Verlauf von k_{\min} und k_{\max} in Abhängigkeit der Diffusionszahl d aufgetragen (Abbildung 3.3, (ii)), entsteht eine Stabilitätskarte, an der das Konzept der Turing-Instabilität besonders eindrücklich nachvollzogen werden kann. Liegt d unter dem kritischen Wert d_c , bilden sich keine Instabilitäten und keine Strukturen aus. Liegt d darüber, ändert sich das Systemverhalten qualitativ. Dieser Punkt wird als Bifurkationspunkt bezeichnet. Die Diffusion, die vorher zu einer Stabilisierung des Systems geführt hat, ist nun der Grund

dafür, dass sich Instabilitäten innerhalb des Systems ausbilden. Die bei Diffusionszahlen kleiner als d_c rein imaginären Wellenzahlen werden beim Überschreiten des Bifurkationspunkts real und führen zur Musterbildung. Der Wert d_c ist durch

$$d_c = \frac{a_{11}a_{22} - 2a_{12}a_{21}}{a_{11}^2} + \sqrt{\left(\frac{a_{11}a_{22} - 2a_{12}a_{21}}{a_{11}^2}\right)^2 - \frac{a_{22}^2}{a_{11}^2}} \quad (3.17)$$

gegeben. Dabei wird das minimale dem maximalem Quadrat der Wellenzahl gleichgesetzt $k_{\min} = k_{\max}$ und der Term in der Wurzel in Gleichung 3.16 verschwindet.

Modenselektion

Obwohl Abbildung 3.3 eine Bandbreite unterschiedlicher Wellenlängen positive Wachstumsraten aufweist, ist in realen Turing-Mustern häufig nur eine oder in manchen Fällen keine charakteristische Wellenlänge zu beobachten. Dies hat unterschiedliche Gründe^{86,87} und wird als Modenselektion bezeichnet:

- (i) Neben den beschriebenen Voraussetzungen zur Ausbildung einer Turing-Instabilität ist zudem notwendig, dass das betrachtete Gebiet eine Mindestgröße aufweist. Ist die Länge der Systemgrenze L kleiner als die größte Wellenlänge λ , können sich keine Instabilitäten ausbilden. Aufgrund der Randbedingungen können sich in begrenzten Gebieten nur Muster ausbilden, die durch ein Vielfaches von $\lambda/2$ beschreibbar sind.
- (ii) Damit verbunden ist der zweite Grund. Aufgrund des exponentiellen Wachstums setzt sich die Wellenlänge mit der größten Wachstumsrate durch. Diese entspricht nicht zwangsläufig dem Scheitelpunkt der Dispersionsrelation, da in begrenzten Gebieten nur diskrete Wellenlängen zulässig sind.
- (iii) Ein letzter Grund liegt in den Anfangsbedingungen begründet. So kann eine bereits im Gebiet ausgeprägte Wellenlänge gegenüber einer Wellenlänge mit größerer Wachstumsrate bevorzugt werden, wenn die Amplitude der anfänglichen Wellenlänge ausreichend groß ist.

Das Resultat des Modells ist damit eine gleichmäßige Verteilung von Spitzen und Tälern der Bevölkerungsdichten der beiden sozialen Gruppen, die den Abstand λ voneinander aufweisen. Gebiete mit einer hohen Dichte an *armer* und einer niedrigen Dichte *reicher* Bevölkerung wechseln sich mit Gebieten

⁸⁶HARTIG, *Analyse von Reaktions-Diffusions-Gleichungen zur Modellierung der Veränderung urbaner Strukturen*, ([79], 2018)

⁸⁷MURRAY, *Mathematical Biology II - Spatial Models and Biomedical Applications*, ([145], 2003)

einer hohen Dichte an *reicher* und einer niedrigen Dichte an *armer* Bevölkerung ab. Da der Fokus der Arbeit auf einer qualitativen Darstellung des Modells liegt, sei für eine detaillierte Analyse des Zusammenhangs zwischen λ und den Modellparametern a_{ij} auf die Standardliteratur⁸⁸ verwiesen.

3.4 Simulationsbasierte Analyse

Die bisherigen Ausführungen beruhen auf einer linearen Stabilitätsanalyse kleiner Störungen. Um den Einfluss des oben beschriebenen Schwellwerts ϑ und das zeitliche Verhalten einer Turing-Instabilität zu untersuchen, sind Simulationen notwendig, mit denen auch die nichtlinearen Anteile der Reaktionskinetik berücksichtigt werden können. Diese Simulationen sind, ähnlich wie die im letzten Kapitel aufgeführten quantitativen Betrachtungen, mithilfe einer Schnakenberg-Kinetik durchgeführt worden. Detailliertere Informationen sind in Anhang A.1 aufgeführt.

3.4.1 Schwellwert zur Erzeugung binärer Muster

Um die in diesem Modell beschriebene Bevölkerungsverteilung mit den in Kapitel 2 erwähnten physisch messbaren Bebauungsstrukturen vergleichen zu können, ist es notwendig, die kontinuierliche Bevölkerungsverteilung des Modells in ein binäres Muster zu überführen. Dies wird durch die Einführung eines Schwellwertes ϑ erreicht. Ist die Konzentration von u_1 größer als der Schwellwert ϑ , wird das Gebiet als informelle Siedlung bezeichnet. Das Prinzip dieses Vorgehens ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

In Abbildung 3.4 (i) ist der Konzentrationsverlauf von u_1 im betrachteten Gebiet aufgetragen. Wird dieser an einer Stelle x_2 betrachtet, entsteht das Muster, wie in Abbildung 3.4 (ii) dargestellt. Diese kontinuierliche Verteilung kann anhand unterschiedlicher Schwellwerte ϑ in ein binäres Muster überführt werden, wie in Abbildung 3.4 (iii) zu sehen ist. Weiterhin kann der vom Schwellwert ϑ abhängige Anteil ermittelt werden, den die informellen Siedlungen an der Gesamtfläche einnehmen. Der in Abbildung 3.4 (iv) dargestellte Anteil $\Phi := A_{\text{INF}}/A_{\text{Ges}}$ der Flächen der informellen Siedlungen A_{INF} an der Gesamtfläche A_{Ges} sinkt mit steigendem Schwellwert ϑ . Da der Gradient der Konzentrationsspitzen ebenfalls von der Reaktionskinetik und damit von f_i und d abhängt, ist die im Modell ermittelte Grundfläche informeller Siedlungen $A_{\text{INF}} = A_{\text{INF}}(f_i, d, \vartheta)$ eine Funktion der dargestellten Parameter. Im Rahmen des Modells kann die Bevölkerungsdichte ϑ als der Schwellwert betrachtet werden, ab dem die Bevölkerung physische Behausungsstruktu-

⁸⁸CROSS UND HOHENBERG, „Pattern formation outside of equilibrium“, ([34], 1993)

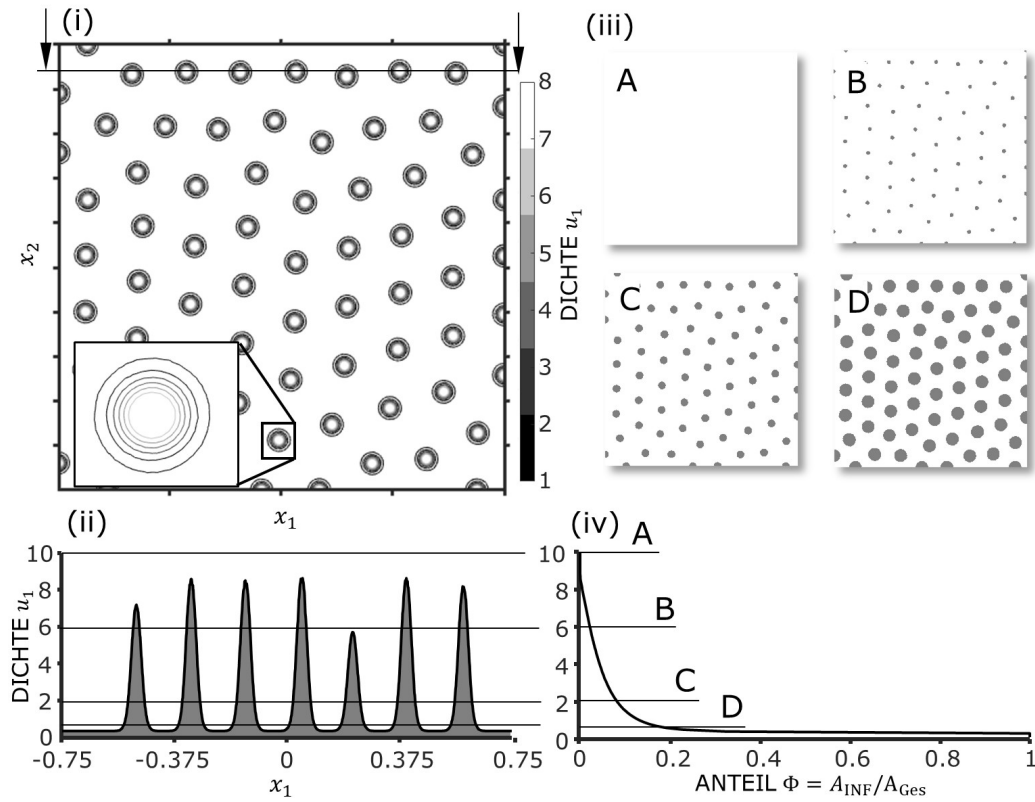


Abbildung 3.4 – (i) Dichteverteilung einer simulierten Turing-Instabilität. Die Reaktionskinetik, sowie die verwendeten Parameter sind im Anhang A.1 in Tabelle A.2 aufgeführt. Der Schnitt in Bild (i) führt zu der in Bild (ii) dargestellten Dichteverteilung. Die vier eingezeichneten Schnitte A, B, C und D in Bild (ii) führen zu den in Bild (iii) dargestellten binären Mustern. In Bild (iv) ist der Anteil Φ in Abhängigkeit vom Schwellwert dargestellt.

ren errichtet. Liegt die Bevölkerungsdichte zu einem bestimmten Zeitpunkt über dem Wert ϑ , werden an dieser Stelle physische Strukturen errichtet. Dieses Verständnis greift das bereits oben beschriebene Konzept der Musterbildung in Tierfellen auf, in denen die beobachteten Muster das Resultat einer Konzentrationsverteilung in der Embryonalentwicklung sind.

3.4.2 Zeitliche Entwicklung eines Turing Musters

In Abbildung 3.5 wird der zeitliche Verlauf der Entwicklung einer Turing-Instabilität betrachtet. Eine zunächst homogene, metastabile Verteilung U_j wird zufällig gestört. Da die Diffusionszahl d oberhalb des Grenzwertes d_c liegt, entstehen infolge des beschriebenen Prozesses Muster.

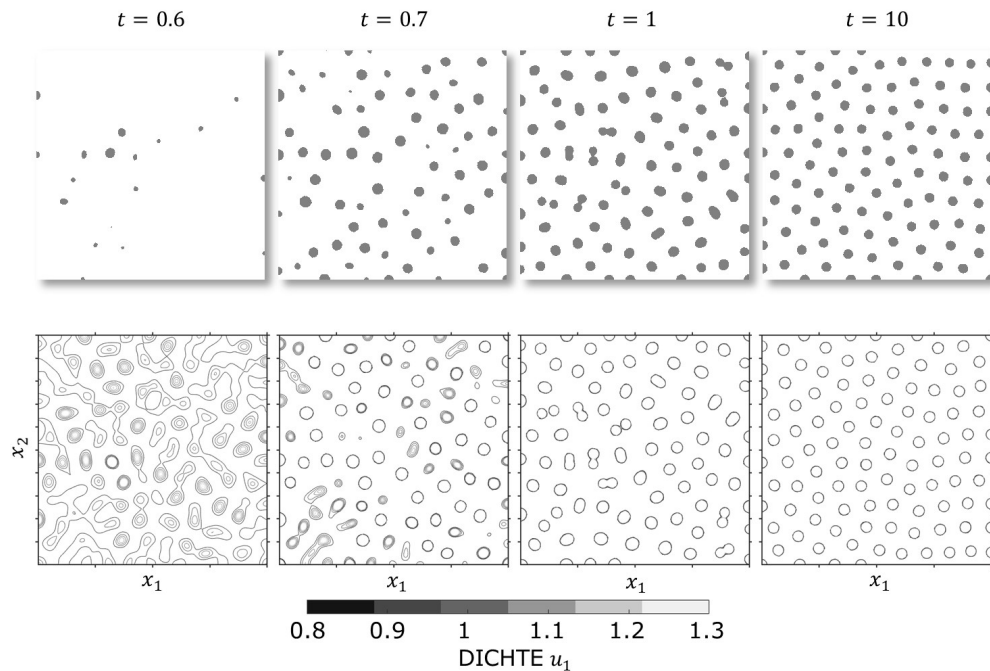


Abbildung 3.5 – Zeitliche Entwicklung einer Turing-Instabilität bei der Verwendung einer Schnakenberg-Kinetik. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle A.2 aufgetragen. Der Schwellwert zur Erzeugung der oberen Reihe ist auf $\vartheta = 1.2$ festgelegt. Die dargestellte Legende bezieht sich auf die Konturdarstellung in der unteren Reihe in der die Bevölkerungsdichte u_1 aufgetragen ist.

Zum Zeitpunkt $t = 0.6$ beginnen sich erste Konzentrationsspitzen auszubilden, die bei $t = 0.7$ deutlich hervortreten. Am Zeitpunkt $t = 1$ ist zu erkennen, dass die Konzentrationsspitzen sich aufteilen und räumlich wandern, so dass diese zum Zeitpunkt $t = 10$ gleichmäßig über das Simulationsgebiet verteilt sind.

3.5 Modellinterpretation

Die bisherigen Ausführungen und Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst und eine Brücke zu den in Kapitel 2 identifizierten Eigenschaften informeller Siedlungen geschlagen.

Das deduzierte Modell beschreibt die Ausbildung informeller Siedlungen durch eine Interaktion zweier sozialer Gruppen mit isotropem Verhalten auf einer homogenen Ebene. Die Beobachtung, dass informelle Siedlungen sich mit formellen Siedlungen abwechseln, bedingt eine Aktivator-Substrat

Reaktionskinetik. Erfüllt die Reaktionskinetik die in der Verhaltensmatrix beschriebenen Bedingungen und ist die Diffusionszahl $d > d_c$ ausreichend groß, werden im System durch Selbstorganisation Muster angeregt. Die Wellenlänge dieser Muster $\lambda_{\min} < \lambda < \lambda_{\max}$ kann mithilfe einer Dispersionsrelation (Abbildung 3.6) ermittelt werden.

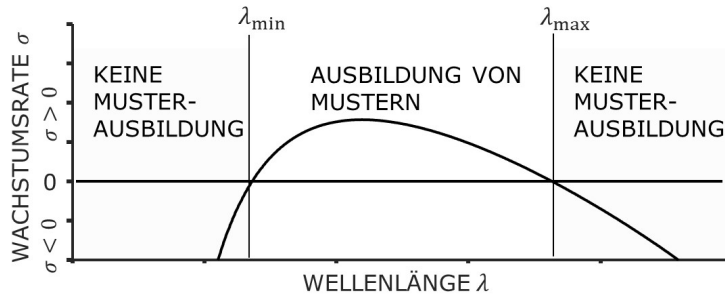


Abbildung 3.6 – Schematische Darstellung einer Dispersionsrelation. Im System werden ausschließlich Muster mit der Wellenlänge $\lambda_{\min} < \lambda < \lambda_{\max}$ angeregt.

Übertragen auf informelle Siedlungen bedeutet dies, dass sich nur informelle Siedlungen mit einem bestimmten Abstand λ zueinander ausbilden. Dieser Abstand $\lambda = \lambda(a_{ij}, d)$ ist eine Funktion der Verhaltensmatrix und der Diffusionszahl d . Die von der Wellenlänge abhängige Größe der Muster $l_M = l_M(a_{ij}, d, \vartheta)$ ist zudem vom Schwellwert ϑ abhängig. Wird das System mit räumlich homogenen Parametern beschrieben, ist von einer gleichmäßigen Verteilung der informellen Siedlungen innerhalb einer Stadt auszugehen. Im Modell können damit unabhängig von der gewählten Reaktionskinetik zwei typische voneinander abhängige Skalen in Systemen informeller Siedlungen abgebildet werden (vgl. Abbildung 3.7). Diese sind

- (i) der typische Abstand λ , den zwei informelle Siedlungen voneinander haben und
- (ii) die Größe bzw. der typische Durchmesser l_M einer einzelnen informellen Siedlung, der proportional zum typischen Abstand ist.

Die sich im System ausbildenden typischen Skalen sind dem Modell nach nicht primär von den geographischen Randbedingungen der jeweils betrachteten Stadt abhängig, sondern dem Verhalten der sich in der Stadt befindenden Personen. Die informellen Siedlungen werden damit als selbstorganisierende, dissipative Strukturen dargestellt, deren Abstand und typische Größe Funktionen des menschlichen Verhaltens sind.

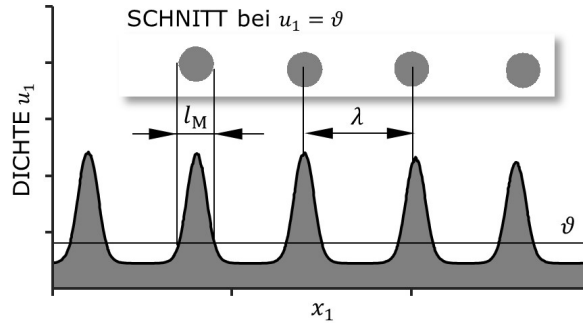


Abbildung 3.7 – Schematische Darstellung der aus einer Turing-Instabilität resultierenden Bevölkerungsdichte u_1 und eines daraus entstehenden binären Musters. Die Konzentrationsspitzen weisen den Abstand λ voneinander auf. Der Durchmesser der Muster l_M hängt von dem Schwellwert ϑ ab.

Die bis zu diesem Punkt durchgeführte Analyse ist dimensionslos. Das bedeutet, dass \tilde{l}_M in Vielfachen der Längenskala $\sqrt{D_1/\hat{R}}$ angegeben wird: $\tilde{l}_M = l_M \sqrt{D_1/\hat{R}}$. Diese Länge wird damit als die Distanz verstanden, welche die *arme* Bevölkerung innerhalb einer bestimmten typischen Reaktionszeit zurücklegt.

Weiterhin gilt im Modell, dass die Interaktion innerhalb der *armen* Bevölkerung sich in Abhängigkeit der Migrationsart ändert. Während sich Mitglieder dieser Gruppe auf lange Distanz (Fernmigration) hin anziehen, stoßen sie sich in kurzer Distanz (Kurzstreckenmigration) ab.

Unter der Annahme, dass die Parameter, welche die menschliche Interaktion beschreiben, und der Schwellwert, ab dem Menschen beginnen Behausungen zu errichten, global ähneln, sind das Resultat des Modells von Kontinent und Kultur unabhängige Skalen (Abstand und Größe) informeller Siedlungen.

Das Modell beschreibt, dass sich zur Bildung informeller Siedlungen in einer Stadt, die dort lebenden unterschiedlichen sozialen Gruppen hinreichend voneinander unterscheiden müssen. Sind die sozialen Gruppen in einer Stadt einander ähnlich, bilden sich keine Instabilitäten aus.

Dieser Aspekt kann an folgendem Beispiel veranschaulicht werden (Abbildung 3.8). Während in London (Großbritannien) aktuell keine informellen Siedlungen zu finden sind, können in Mumbai (Indien) mehr als eintausend dieser Siedlungsareale identifiziert werden⁸⁹. Dem Modell entsprechend kann die Situation folgendermaßen interpretiert werden: Die Bevölkerungsgruppen in London weisen ähnliche Eigenschaften und Mobilitäten auf, weshalb die Diffusionszahl $d < d_c$ kleiner als die kritische Diffusionszahl ist. Dabei ist zu

⁸⁹FRIESEN U. A., „The similar size of slums“, ([57], 2018)

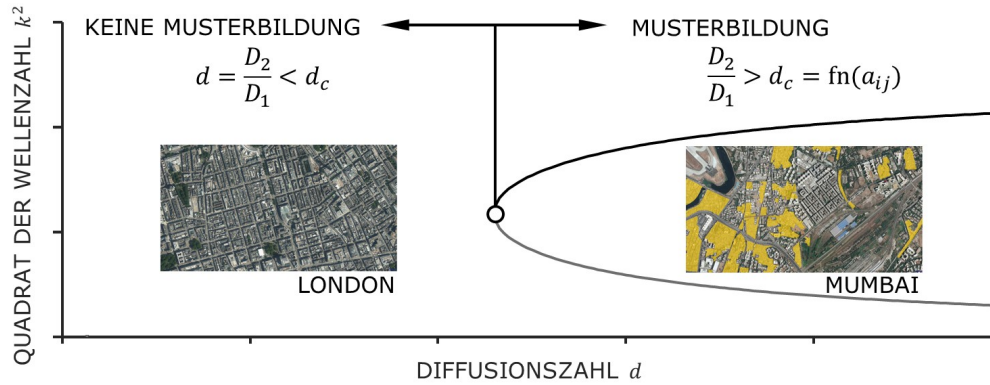


Abbildung 3.8 – In Abhängigkeit der Diffusionszahl aufgetragene Stabilitätskarte für das entwickelte Modell. Die diffusionsgetriebene Instabilität entsteht bei Diffusionswerten $d > d_c$. Beispielhaft sind Satellitenaufnahmen zweier Städte (London und Mumbai) aufgeführt.

beachten, dass die kritische Diffusionszahl eine Funktion der Fernmigration ist $d_c = d_c(a_{ij})$. Dagegen unterscheiden sich die Mobilitäten der jeweiligen sozialen Gruppen in Mumbai und vielen weiteren Städten des globalen Südens stark voneinander. Da die Diffusionszahl in diesen Städten über der kritischen Grenze $d > d_c$ liegt, bilden sich informelle Siedlungen aus. Dem Modell nach ist somit die wesentliche Ursache für die Entstehung informeller Siedlungen nicht das starke Bevölkerungswachstum, sondern die starken Unterschiede in der Mobilität der in der Stadt lebenden sozialen Gruppen.

Es sei erwähnt, dass das hier aufgeführte Modell, trotz der dargestellten mathematischen Herleitungen und verwendeten Parameter, einen qualitativen Charakter aufweist. Die von Schnakenberg angeführte Reaktionskinetik dient vor allem als Konkretisierung der vorgestellten linearen Stabilitätsanalyse. Eine quantitative Beschreibung der Kinetik, welche die Entstehung informeller Siedlungen beschreibt, ist nicht bekannt.

Die Modellierung und Interpretation wird deshalb mit einer Aussage abgeschlossen, mit der Turing seine Arbeit⁹⁰ einleitet:

«Dieses Modell wird eine Vereinfachung und eine Idealisierung und damit eine Falsifikation sein. Es ist zu hoffen, dass die Merkmale, die für die Diskussion beibehalten werden, diejenigen sind, die beim gegenwärtigen Stand der Diskussion von größter Bedeutung sind.»

⁹⁰TURING, „The Chemical Basis of Morphogenesis“, ([220], 1952)

Kapitel 4

Empirische Analyse

*We need science.
We need empirical evidence.
We can't just use mathematical
reasoning to deduce the nature of the world.*

Rebecca Goldstein¹

Den bisher rein theoretischen Überlegungen werden in diesem Kapitel Untersuchungen realer Siedlungsverteilungen gegenübergestellt. Die dafür verwendeten empirischen Daten wurden mithilfe von Fernerkundung gewonnen und bilden informelle Siedlungen in Städten des globalen Südens ab. Diese Siedlungsverteilungen werden im Folgenden hinsichtlich ihrer räumlichen Skalen untersucht². Zunächst werden dafür die verwendeten Daten und Methoden dargelegt (Abschnitt 4.1). Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Analyse räumlicher Muster. Anschließend werden die Methoden angewendet und neben den Verteilungen die Siedlungsdichte und räumlichen Verteilungen näher untersucht (Abschnitt 4.2).

4.1 Daten und Methoden

4.1.1 Siedlungsdaten

Dem Fokus der bisherigen Ausführungen folgend, werden in diesem Kapitel ausschließlich binäre Verteilungen der räumlichen Ausbreitung von physi-

¹ 1950-, Amerikanische Philosophin

² Die hier aufgeführten Methoden und Ergebnisse sind in detaillierter Form bereits in den Veröffentlichungen [57, 56, 51] beschrieben und werden im Folgenden in zusammengefasster Form wiedergegeben.

schen Siedlungsstrukturen untersucht³. Konkret fokussiert sich die folgende Untersuchung auf die in Kapitel 2 beschriebenen *morphologischen Slums* als morphologische Konkretisierung informeller Siedlungen, die mithilfe von Erdbeobachtungsdaten identifiziert wurden. Die zur Erfassung dieser Siedlungen verwendete Methodik wird dafür kurz rekapituliert. Weiterhin wird die Sensitivität des Ergebnisses auf die Klassifikationsmethodik untersucht.

Morphologische Slums

Morphologische Slums lassen sich unter Verwendung von hochauflösenden Erdbeobachtungsdaten (Auflösung < 1 m) von der umliegenden Umgebung unterscheiden, was anhand von Abbildung 4.1 nachvollzogen werden kann. Das südöstlich der großen Straße liegende Siedlungsareal unterscheidet sich in seiner Morphologie deutlich von den Gebäudestrukturen seiner Umgebung.



Abbildung 4.1 – Ausschnitt aus Mumbai (Indien) (i) ohne und (ii) mit den durch die vorgestellte Methodik hervorgehobenen morphologischen Slums. Die Areale werden durch geographisch kodierte Polygone dargestellt.

Um morphologische Slums entsprechend der Methodik von Taubenböck, Kraff und Wurm⁴ zu identifizieren, werden auf der Siedlungsebene Parameter, wie eine hohe Siedlungsdichte und eine organische, komplexe Anordnung von

³ Kontinuierliche Darstellungen der Bebauung oder Bevölkerungsdichten wären ebenfalls von Interesse und es werden in der neueren Literatur immer wieder Ansätze präsentiert und diskutiert (vgl. [212, 213]), in denen die Bevölkerungsdichten beispielsweise in Gitterzellen erfasst werden. Allerdings ist, wie bereits in Kapitel 2 diskutiert, im Hinblick auf Fragen der Infrastrukturplanung, die Analyse physischer Strukturen einfacher zu erfassen und ebenfalls von hoher Bedeutung.

⁴ TAUBENBÖCK, KRAFF UND WURM, „The morphology of the Arrival City - A global categorization based on literature surveys and remotely sensed data“, ([208], 2018)

Gebäuden verwendet. Ob diese Parameter in der jeweils untersuchten Stadt de facto gegeben sind, wird relativ zur gesamten Stadtmorphologie und der direkten Umgebung der Siedlungen untersucht und bewertet. Eine visuelle Interpretation der Grenzen der morphologischen Slums wird durch eine ortskundige Person durchgeführt, die dem in Kapitel 2 beschriebenen standardisierten Protokoll folgt. Dieses Vorgehen erlaubt einen hohen Grad an Genauigkeit, der bisher noch nicht von automatisierten Verfahren erreicht wird^{5,6}. Um die von Taubenböck, Kraff und Wurm⁷ beschriebenen physikalischen Parameter ihrer definierten Ontologie befolgen zu können, schreibt das Protokoll eine Digitalisierung bei einer Auflösung von 1:1000 vor. Um zwei morphologische Slums voneinander zu unterscheiden, wird eine Distanz von 10 m verwendet⁸. Das Ergebnis dieser Klassifikation sind geografisch kodierte Polygone (vgl. Abbildung 4.1, (ii)), die die Umrandungen der morphologischen Slums darstellen.

In Abbildung 4.1 sind beispielhaft drei morphologische Slums, beziehungsweise Ausschnitte davon, dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass durch die vorgestellte Methodik die Grenzen zwischen formellen und informellen Siedlungen identifiziert werden können. Auch wird der Einfluss, der oben beschriebenen Klassifizierungsmethodik deutlich. Dadurch, dass die Straße, die durch das östliche Siedlungsareal führt, eine geringere Breite als 10 m aufweist, wird die Siedlung als ein einzelnes Areal betrachtet. Dagegen ist die Straße im nordwestlichen Areal breiter als 10 m, sodass die Siedlungsareale getrennt voneinander erfasst werden.

Dieses Vorgehen wird für insgesamt acht Städte des Globalen Südens durchgeführt: (i) Dhaka in Bangladesch, (ii) Rio de Janeiro und (iii) Sao Paulo in Brasilien, (iv) Mumbai in Indien, (v) Manila auf den Philippinen, (vi) Kapstadt in Südafrika, (vii) Kairo⁹ in Ägypten und (viii) Caracas in Venezuela. Alle Städte gehören zu den größten Städten ihres jeweiligen Landes und haben mindestens zwei Millionen Einwohner. Die Einwohnerzahlen sind in

⁵ KUFFER, PFEFFER UND SLIUZAS, „Slums from Space—15 Years of Slum Mapping Using Remote Sensing“, ([117], 2016)

⁶ MAHABIR U. A., „A Critical Review of High and Very High-Resolution Remote Sensing Approaches for Detecting and Mapping Slums“, ([129], 2018)

⁷ TAUBENBÖCK, KRAFF UND WURM, „The morphology of the Arrival City - A global categorization based on literature surveys and remotely sensed data“, ([208], 2018)

⁸ FRIESEN U. A., „The similar size of slums“, ([57], 2018)

⁹ Die für Kairo verwendeten Daten werden durch ein leicht angepasstes Verfahren ermittelt. Dabei wurde auf eine Publikation von Sims [196] zurückgegriffen, in der die Ankunftsstädte in Kairo in vier Kategorien eingeteilt wurden. Eine dieser Kategorien entspricht in großer Näherung des hier verwendeten Konzeptes eines morphologischen Slums. Detailliertere Informationen zum Vorgehen finden sich bei Friesen und anderen [56].

Tabelle 4.1 – Anzahl der Einwohner der untersuchten Städte entsprechend der neusten verfügbaren Zensusdaten [56].

Stadt	Bevölkerung in Mio.	Jahr
Sao Paulo, Brasilien	12.1	2017
Rio de Janeiro, Brasilien	7.5	2015
Caracas, Venezuela	4.1	2017
Dhaka, Bangladesch	14.4	2015
Mumbai, Indien	12.4	2011
Manila, Philippinen	12.9	2015
Kapstadt, Südafrika	3.7	2011
Kairo, Ägypten	18.3	2017

Tabelle 4.1 aufgelistet. Weiterhin liegen die Städte auf drei unterschiedlichen Kontinenten (Afrika, Asien und Südamerika) und weisen unterschiedliche kulturelle Randbedingungen auf. Die Lokalisation der Städte ist auf der Weltkarte in Abbildung 4.2 zu sehen. Die verwendeten Daten wurden im Rahmen einer Kooperation vom Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) zur Verfügung gestellt. Detailliertere Beschreibungen der Datensätze und der zur Erfassung der morphologischen Slums angewendeten Methodik finden sich in den zitierten und weiteren Publikationen von Taubenböck, Wurm und anderen^{10,11}. Im Anhang A.2 sind Satellitenaufnahmen der Städte und die in der jeweiligen Stadt identifizierten morphologischen Slums dargestellt.

Es sei erwähnt, dass durch diese Analyse lediglich ein Ausschnitt an den weltweit vorhanden morphologischen Slums repräsentiert wird. Wird davon ausgegangen, dass die von Davis¹² angegebene Schätzung von weltweit 200 000 solcher Siedlungen gilt, werden in der vorliegenden Arbeit etwa 4% davon untersucht.

Vor allem Städte in Subsahara-Afrika, in denen 55% der Stadtbevölkerung in informellen Siedlungen lebt, sind in dieser Arbeit aufgrund fehlender Daten nicht ausreichend repräsentiert. Die Vereinten Nationen schätzen, dass Subsahara-Afrika für 56% des Anstiegs an Slumbewohnern im Zeitraum

¹⁰TAUBENBÖCK, KRAFF UND WURM, „The morphology of the Arrival City - A global categorization based on literature surveys and remotely sensed data“, ([208], 2018)

¹¹MÜLLER U. A., „Misperceptions of Predominant Slum Locations?“, ([143], 2020)

¹²DAVIS, *Planet of slums*, ([35], 2006)

zwischen 1990 und 2014 verantwortlich war¹³. Zukünftige Studien zu der Verteilung und Größe morphologischer Slums in den großen Städten dieses Kontinents wie beispielsweise Lagos in Nigeria oder Kinshasa in der Demokratischen Republik Kongo sind deshalb von hoher Relevanz.



Abbildung 4.2 – Darstellung der im globalen Süden untersuchten Städte.

Sensitivitätsanalyse

Obwohl der hier gewählte Ansatz zur Klassifikation morphologischer Slums eine globale Vergleichbarkeit der Ergebnisse garantiert, bleibt die Frage offen, wie sensitiv das Ergebnis auf die Art der oben beschriebenen Klassifikation ist. Um dies zu untersuchen, wird der Einfluss der räumlichen Trennung der morphologischen Slums auf das Ergebnis ermittelt. Dafür werden für alle untersuchten Datensätze Puffer der Breite b_p auf die räumlichen Polygone gegeben. Das Vorgehen ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Überschneiden sich die Puffer zweier Polygone, werden die jeweiligen morphologischen Slums zusammengefasst und die Größe des durch die Verbindung neu entstandenen Objekts berechnet. Mithilfe dieses Vorgehens wird ermittelt, wie sich die resultierenden Größenverteilungen in Abhängigkeit der oben genannten Definition ändern¹⁴. Auf diese Weise kann ermittelt werden, welchen Einfluss es auf die Größenverteilung ausübt, wenn die in Abbildung 4.1 im Nordwesten des

¹³UNITED NATIONS, *Urbanization and development*, ([222], 2016)

¹⁴FRIESEN U. A., „Sensitivity of slum size distributions as a function of spatial parameters for slum classification“, ([51], 2019)

dargestellten Gebietes bereits erwähnte Straße als Teil des morphologischen Slums betrachtet wird.

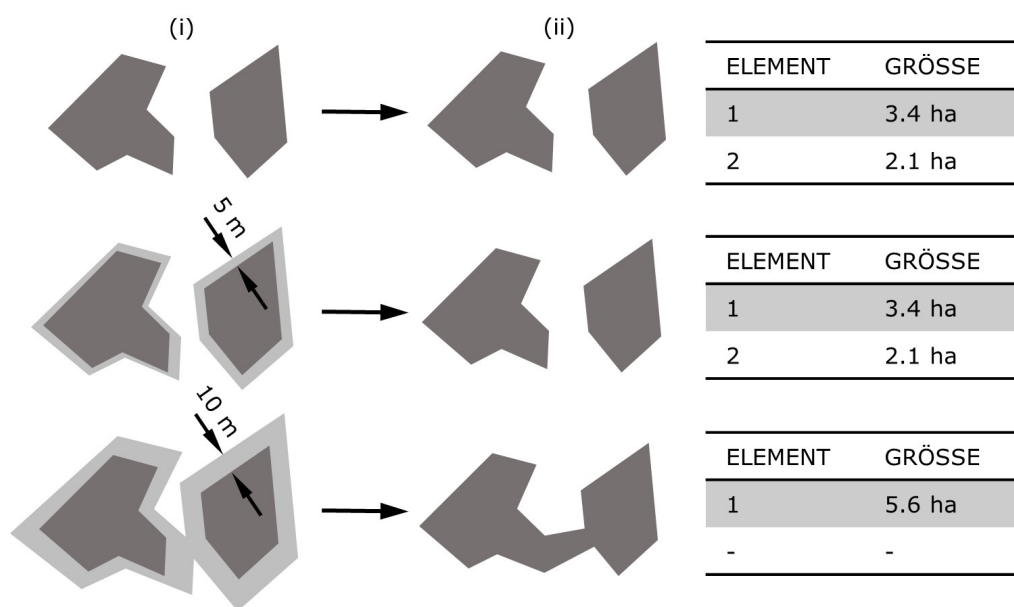


Abbildung 4.3 – Schematische Darstellung des Vorgehens in der Sensitivitätsanalyse

4.1.2 Statistische Analysen räumlicher Muster

Zum quantitativen Vergleich der räumlichen Verteilungen morphologischer Slums in den untersuchten Städten werden drei Parameter untersucht: (i) die Häufigkeitsverteilung der Grundfläche, (ii) die Siedlungsdichte und (iii) die Regelmäßigkeit der Anordnung der Siedlungen¹⁵.

Häufigkeitsverteilungen der Grundfläche

Eine charakteristische Größe morphologischer Slums ist deren Grundfläche A . Diese stellt neben der Grundfläche einzelner Gebäude eine grundlegende Skala dar, die für die Planung angemessener Infrastruktur notwendig ist. In der Analyse werden deshalb sowohl die Häufigkeitsverteilungen der Grundfläche betrachtet, als auch deren Momente.

¹⁵Alle vorgestellten Untersuchungen wurden mit MATLAB durchgeführt.

Das erste untersuchte Moment ist der geometrische Mittelwert

$$\hat{A} := \sqrt[N]{\prod_{i=1}^N A_i}. \quad (4.1)$$

Hierbei stellt N die Anzahl an morphologischen Slums und A_i die Grundfläche eines spezifischen morphologischen Slum i dar. Da die Grundflächen der untersuchten morphologischen Slums Werte zwischen 10^{-4} km² und bis mehr als 1 km² und damit unterschiedliche Größenordnungen aufweisen, wird der geometrische Mittelwert verwendet. Letzterer gewichtet sehr große Werte weniger stark, als der arithmetische Mittelwert.

Das zweite Moment einer Größenverteilung ist die Standardabweichung. Diese ist in Bezug auf den geometrischen Mittelwert definiert als

$$\sigma_A := \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log^2 A_i / \hat{A}}. \quad (4.2)$$

Sie beschreibt, um wie viele Größenordnungen der Großteil der untersuchten Grundflächen morphologischer Slums um den oben berechneten geometrischen Mittelwert \hat{A} schwankt.

Weiterhin wird untersucht, in welchen Größenordnungen die Flächen der identifizierten morphologischen Slums liegen. Dafür wird der Anteil an morphologischen Slums in einer bestimmten Größenordnung ermittelt, indem die Häufigkeitsverteilung in fünf Sektoren (Tabelle 4.2) eingeteilt wird. Diese decken jeweils eine Größenordnung ab.

Tabelle 4.2 – Sektorgrenzen zur Untersuchung der Anteile morphologischer Slums bestimmter Größe an der Gesamtmenge aller untersuchten morphologischen Slums

Sektor	untere Grenze in km ²	obere Grenze in km ²
I	10^{-4}	10^{-3}
II	10^{-3}	10^{-2}
III	10^{-2}	10^{-1}
IV	10^{-1}	1
V	1	10

Als relativer Flächenanteil

$$\alpha_I := \frac{\sum_{i=1}^N A_i}{A_{MS}} \quad \forall \quad 10^{-4} \text{ km}^2 < A_i < 10^{-3} \text{ km}^2 \quad (4.3)$$

werden im Fall des ersten Sektors die Grundflächen aller morphologischen Slums, die eine Größe zwischen 10^{-4} km^2 und 10^{-3} km^2 aufweisen, addiert und durch die Gesamtfläche $A_{\text{MS}} := \sum_{i=1}^N A_i$ aller morphologischen Slums dividiert. Dieses Vorgehen wird analog für die anderen Sektoren durchgeführt.

In einem weiteren Schritt wird die relative Anzahl morphologischer Slums in dem jeweiligen Sektor berechnet

$$\beta_{\text{I}} := \frac{N_{\text{I}}}{N}. \quad (4.4)$$

Dichte

Die zweite charakteristische Größe ist die Siedlungsdichte Φ der Siedlungsverteilung. Die Siedlungsdichte

$$\Phi := \frac{\sum_{i=1}^N A_i}{A_{\text{Stadt}}} \quad (4.5)$$

morphologischer Slums ist als das Verhältnis zwischen der durch die morphologischen Slums eingenommene Gesamtfläche $A_{\text{MS}} := \sum_{i=1}^N A_i$ und der Stadtfläche A_{Stadt} definiert. Wie bereits zu Beginn von Kapitel 2 gezeigt wird, ist eine Vielzahl unterschiedlicher Definitionen von Städten oder Stadtgrenzen vorhanden. Da sich die hier vorliegende Analyse auf physische urbane Morphologien bezieht, wird zur Beschreibung der Stadtfläche A_{Stadt} auf eine Definition von Taubenböck und anderen¹⁶ zurückgegriffen, die die Stadtgrenzen anhand der Morphologie der bebauten Fläche ermittelt.

Regelmäßigkeit

Neben der Analyse der Grundflächen morphologischer Slums und deren Anteil an der Fläche der Stadt, ist aus infrastruktureller Perspektive vor allem deren räumliche Anordnung von Interesse. Dabei stellt sich die Frage, ob diese Siedlungsstrukturen, wie in dem Modell aus Kapitel 3 beschrieben, regelmäßige Anordnungen aufweisen, ob sie zufällig über das Stadtgebiet verteilt oder in räumlichen Clustern angeordnet sind.

Zur Quantifizierung der Regelmäßigkeit ist in der Literatur eine Vielzahl von Methoden¹⁷ zu finden. Im Kern beruhen die meisten dieser Methoden auf dem Ansatz, Eigenschaften der zu untersuchenden räumlichen Verteilung mit den korrespondierenden Eigenschaften einer durch Zufallsprozesse generierten

¹⁶TAUBENBÖCK U. A., „A new ranking of the world’s largest cities—Do administrative units obscure morphological realities?“, ([204], 2019)

¹⁷ILLIAN, *Statistical analysis and modelling of spatial point patterns*, ([93], 2008)

Verteilung zu vergleichen. Bekannte Ansätze sind Punktkorrelationsfunktionen, Ripley-Funktionen oder Analysen des mittleren nächsten Nachbarn¹⁸. Daneben haben sich in den letzten Jahren Methoden der Clusteranalyse aus dem Bereich des maschinellen Lernens zur Beschreibung räumlicher Muster etabliert¹⁹.

In dieser Arbeit wird die Analyse der Regelmäßigkeit unter Verwendung des nächsten Nachbarn nach Clark und Evans²⁰ beschrieben.

Dafür wird für jeden Flächenschwerpunkt eines morphologischen Slum i die Distanz r_i zum jeweils nächsten Nachbarn ermittelt und in einer Häufigkeitsverteilung aufgetragen. Die Reduktion der räumlichen Informationen auf den Schwerpunkt ist ein in der Analyse räumlicher Muster gängiges Vorgehen²¹. In einem weiteren Schritt wird der Mittelwert

$$r_E = \frac{\sum_i^N r_i}{N} \quad (4.6)$$

der nächsten Nachbarn der zu untersuchenden Objekte ermittelt. Zur Beurteilung der Regelmäßigkeit der Objektanordnung wird der mittlere nächste Abstand r_E ins Verhältnis zum mittleren nächsten Abstand

$$r_A = \frac{1}{2\sqrt{N/A_{\text{Ges}}}} \quad (4.7)$$

zwischen N zufällig auf der Fläche A_{Ges} verteilten Punkten gesetzt²². A_{Ges} ist die Fläche, die alle N zu untersuchenden Objekte umschließt.

Diese häufig nach den Autoren Clark und Evans²⁰ benannte Größe

$$R := \frac{r_E}{r_A} \quad (4.8)$$

beschreibt die Regelmäßigkeit eines Musters.

Ist der Wert $R < 1$ so liegen die untersuchten Objekte näher beieinander, als in einer zufälligen Verteilung. Das Muster ist somit geclustert. Bei $R \approx 1$ ist die Verteilung zufällig verteilt, bei Werten $R > 1$ regelmäßig.

Die Unsicherheit dieser Aussagen wird durch einen doppelseitigen Signifikanztest untersucht, bei dem die Differenz zwischen r_E und r_A zur typischen

¹⁸ILLIAN, *Statistical analysis and modelling of spatial point patterns*, ([93], 2008)

¹⁹TIESSEN U. A., „Using remote sensing data and cluster algorithms to structure cities“, ([214], 2019)

²⁰CLARK UND EVANS, „Distance to Nearest Neighbor as a Measure of Spatial Relationships in Populations“, ([31], 1954)

²¹PRINGLE UND TARNITA, „Spatial Self-Organization of Ecosystems“, ([164], 2017)

²²Die Autoren Clark und Evans [31] verwenden eine Poisson Verteilung und verweisen auf die Arbeit von P. Hertz [87].

Streuung σ_c ins Verhältnis gesetzt wird. Dieser Test beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass trotz einer zufälligen Verteilung ein bestimmter Wert r_E beobachtet wird. Der von Clark und Evans²³ beschriebene z -Wert ermittelt sich durch

$$z := \frac{r_E - r_A}{\sigma_c} \quad (4.9)$$

mit $\sigma_c = 0.26136/\sqrt{N^2/A_{\text{Ges}}}$. Ein Wert von $z < -2.58$ zeigt an, dass eine solche Verteilung mit einem Signifikanzniveau von 99% nicht durch eine zufällige Verteilung entstanden und deshalb geclustert ist. Ein Wert von $z > 2.58$ beschreibt wiederum, dass die beobachtete Verteilung ebenfalls mit einem Signifikanzniveau von 99% nicht durch eine zufällige Verteilung entstanden, sondern regelmäßig angeordnet ist.

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Häufigkeitsverteilungen der Grundfläche

Morphologische Slums

In Abbildung 4.4 sind die Häufigkeitsverteilungen der Grundflächen morphologischer Slums in den untersuchten Städten dargestellt. Die die Verteilungen beschreibenden Momente sind in Tabelle 4.3 aufgelistet.

Insgesamt werden in den acht untersuchten Städten 7265 morphologische Slums identifiziert. Die Anzahl morphologischer Slums pro Stadt liegt zwischen 41 in Kairo (Ägypten) und 2125 in Dhaka (Bangladesch). In der Hälfte der Städte (Sao Paulo, Dhaka, Mumbai und Manila) sind jeweils mehr als eintausend morphologische Slums vorhanden. Der geometrische Mittelwert \hat{A} der Grundflächen morphologischer Slums in den untersuchten Städten variiert zwischen 0.0021 km^2 in Dhaka (Bangladesch) und 0.0942 km^2 in Caracas (Venezuela). Dabei zeigen sechs der acht untersuchten Städte (Dhaka, Rio de Janeiro, Sao Paulo, Manila, Mumbai und Kapstadt) einen geometrischen Mittelwert zwischen 0.002 und 0.02 km^2 und liegen damit innerhalb einer Größenordnung. Die geometrischen Mittelwerte der morphologischen Slums in Caracas und Kairo sind dagegen mit 0.0942 km^2 bzw. 0.0572 km^2 deutlich größer.

Weiterhin weisen die logarithmischen Abweichungen der Verteilungen vom jeweiligen Mittelwert der meisten Städte Werte von $\sigma_A < 1.5$ auf. Die Grö-

²³CLARK UND EVANS, „Distance to Nearest Neighbor as a Measure of Spatial Relationships in Populations“, ([31], 1954)

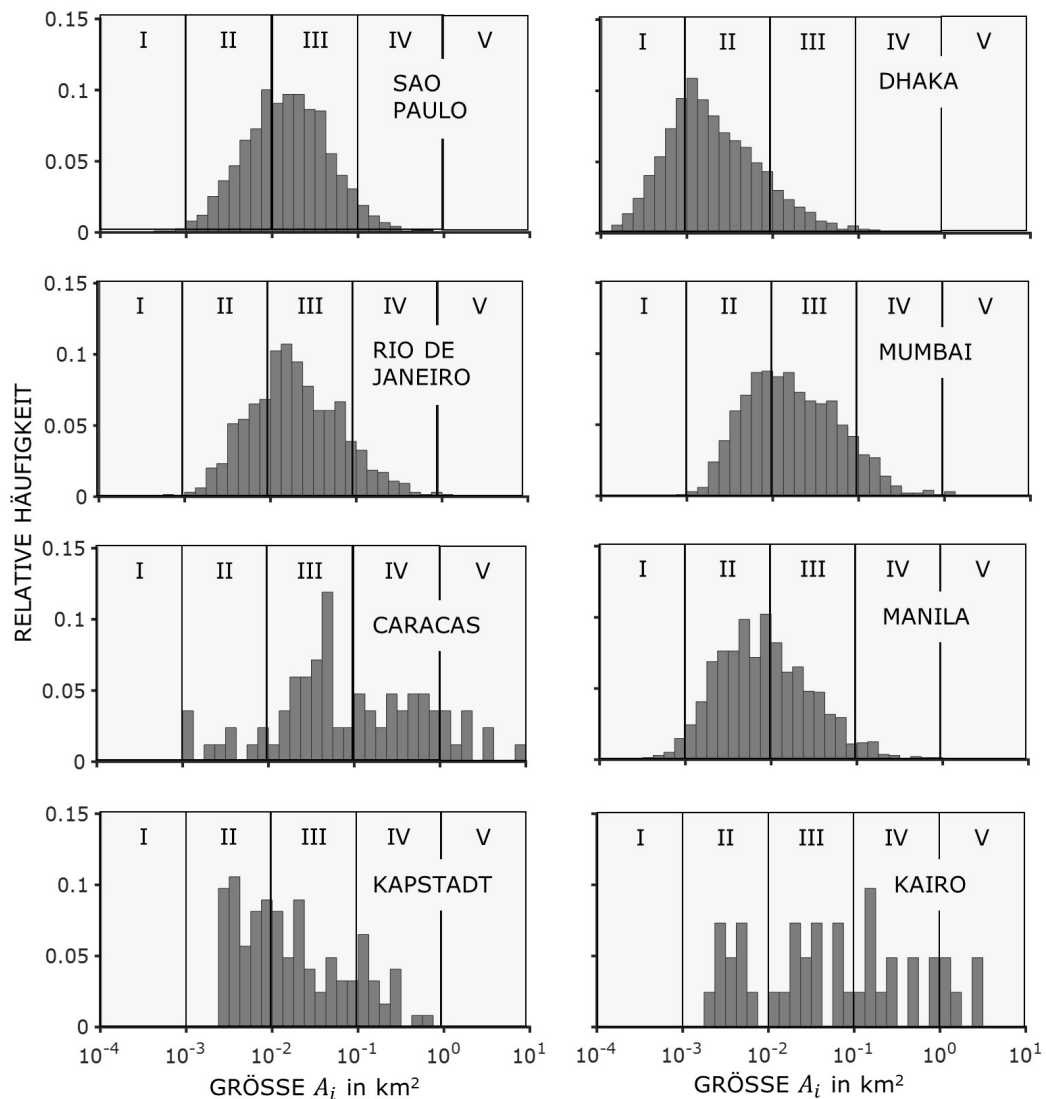


Abbildung 4.4 – Häufigkeitsverteilungen morphologischer Slums in den acht untersuchten Städten.

Benverteilungen von Caracas und Kairo unterscheiden sich mit Werten von $\sigma_A > 2$ von den restlichen sechs Städten und sind weitaus breiter, wie in Abbildung 4.4 zu sehen ist.

Ein visueller Vergleich der Häufigkeitsverteilungen in Abbildung 4.4 zeigt, dass sich deren Form in fünf der acht untersuchten Städte (Rio de Janeiro, Sao Paulo, Mumbai, Manila und Dhaka) trotz unterschiedlicher Anzahl an klassifizierten morphologischen Slums qualitativ ähnelt und eine Form ähnlich einer logarithmischen Normalverteilung aufweist. Diese Art von Größenver-

Tabelle 4.3 – Anzahl der identifizierten morphologischen Slums N , des geometrischen Mittelwerts \hat{A} , der Abweichung σ_A , sowie den Anteilen $\alpha_I - \alpha_V$ und $\beta_I - \beta_V$ in den jeweiligen Sektoren. Da eines der in Caracas identifizierten morphologischen Slums eine Größe von 12.9 km^2 aufweist, und damit größer als 10 km^2 ist, liegt die Summe von $\alpha_I - \alpha_V$ deutlich unter 100%.

Stadt	α_I β_I	α_{II} β_{II}	α_{III} β_{III} in %	α_{IV} β_{IV}	α_V β_V	\hat{A} in km^2	σ_A	N
Sao Paulo, Brasilien	0 0.5	7.0 36.6	61.5 58.2	31.5 4.6	0 0	0.0141	1.26	1897
Rio de Janeiro, Brasilien	0 0.2	3.6 29.2	43.8 60.9	48.6 9.6	4.0 0.2	0.0195	1.22	644
Caracas, Venezuela	0 0	0.1 12.2	2.5 41.5	20.7 32.9	51.7 12.2	0.0942	2.07	82
Dhaka, Bangladesh	2.7 30.7	27.5 57.3	41.7 11.0	28.1 0.9	0 0	0.0021	1.31	2125
Mumbai, Indien	0 0.1	5.0 37.7	43.9 53.3	42.4 8.6	8.7 0.3	0.0171	1.25	1003
Manila, Philippinen	0.1 2.6	11.0 55.9	46.3 37.7	36.8 3.7	5.8 0.1	0.0085	1.28	1350
Kapstadt, Südafrika	0 0	4.6 43.1	26.6 39.8	68.8 17.1	0 0	0.0171	1.41	123
Kairo, Ägypten	0 0	0.3 24.4	4.2 34.1	30.1 29.3	65.4 12.2	0.0572	2.07	41

teilung ist bereits aus der Analyse inter-urbaner Strukturen bekannt^{24,25}. In detaillierten Untersuchungen unter Verwendung statistischer Tests kann ermittelt werden, welche Art von Verteilungsfunktion die relative Häufigkeit der Grundflächen morphologischer Slums in einer Stadt bestmöglich beschreibt²⁶. Trotz ähnlicher Kennwerte von \hat{A} und σ_A stellt die Größenverteilung der morphologischen Slums von Kapstadt eine Ausnahme dar. Die Verteilung

²⁴REED, „On the Rank-Size Distribution for Human Settlements“, ([175], 2002)

²⁵REED UND JORGENSEN, „The Double Pareto-Lognormal Distribution—A New Parametric Model for Size Distributions“, ([176], 2004)

²⁶FRIESEN U. A., „Size Distributions for Morphological Slums in Asia and South America“, ([52], 2019)

erscheint weitaus unregelmäßiger als die Verteilungen in anderen Städten. Dies liegt vor allem an der geringen Anzahl der morphologischen Slums und der Tatsache, dass in Kapstadt neben den morphologischen Slums auch andere Siedlungen urbaner Armut mit anderen morphologischen Charakteristika existieren. Diese im Rahmen der Apartheid entstandenen, sogenannten Townships beherbergen einen Großteil der *armen* Bevölkerung. Werden die Größenverteilungen miteinander verglichen, wird deutlich, dass die Siedlungsverteilung mit Townships ebenfalls einer logarithmischen Normalverteilung ähnelt²⁷. Ähnlich, wie bei Kapstadt, scheint auch in Kairo die Heterogenität der Morphologie der untersuchten Ankunftsstädte und die damit verbundene sehr kleine Zahl morphologischer Slums zu der unregelmäßigen Größenverteilung zu führen²⁸. Die in Caracas identifizierten morphologischen Slums sind im Vergleich zu den Siedlungen in den anderen betrachteten Städten sehr groß, was in Abbildung A.1 deutlich zu sehen ist.

Größenordnungen

Eine Analyse der Größenordnungen der morphologischen Slums in den jeweiligen Städten zeigt, dass die meisten Objekte eine Größe zwischen 10^{-3} km^2 und 10^{-1} km^2 (Sektor II und III) aufweisen. Während in Sao Paulo, Rio de Janeiro, Manila und Mumbai mehr als 90% aller ermittelten morphologischen Slums eine Fläche in dieser Größenordnung aufweisen, sind es in Kapstadt mehr als 80%.

Im Gegensatz dazu sind die in Dhaka identifizierten morphologischen Slums kleiner. Hier haben 30.7% aller untersuchten Siedlungsobjekte eine Grundfläche die kleiner als 10^{-3} km^2 ist. In Kairo und Caracas wiederum ist ein großer Teil der Slums (jeweils etwa 40%) größer als 10^{-1} km^2 , was auch die großen geometrischen Mittelwerte \hat{A} dieser Städte erklärt.

Werden alle 7265 untersuchten morphologischen Slums gemeinsam betrachtet (Tabelle 4.4), so haben 84.6% aller untersuchten Slums eine Größe zwischen 10^{-3} km^2 und 10^{-1} km^2 .

Wird der Flächenanteil betrachtet, so verschiebt sich dieses Bild hin zu größeren Arealen. Etwa 43% der untersuchten morphologischen Slumfläche wird von Slums eingenommen, die kleiner als 10^{-1} km^2 sind.

Eine Extrapolation von denen hier vorgestellten acht Städten auf die weltweit schätzungsweise 1 Milliarde Bewohner von Slums unter Annahme einer kon-

²⁷Dieser Einfluss der Klassifikationsmethodik wird detailliert von Friesen und anderen [57] besprochen.

²⁸FRIESEN U. A., „Size distributions of slums across the globe using different data and classification methods“, ([56], 2019)

Tabelle 4.4 – Anzahl der identifizierten morphologischen Slums N , des geometrischen Mittelwerts \hat{A} , der Abweichung σ_A , sowie den Anteilen $\alpha_I - \alpha_V$ und $\beta_I - \beta_V$ in den jeweiligen Sektoren.

	α_I β_I	α_{II} β_{II}	α_{III} β_{III} in %	α_{IV} β_{IV}	α_V β_V	\hat{A} in km ²	σ_A	N
Alle untersuchten	0.2	6.1	36.6	34.4	17.3	0.0815	1.57	7265
morph. Slums	9.6	45.5	39.5	5.0	0.3			

stanten Bevölkerungsdichte in allen morphologischen Slums²⁹, führt zu der Aussage, dass mehr als 80% in morphologischen Slums wohnen, die kleiner als 1 km² sind und etwa 43% in morphologischen Slums mit einer Größe kleiner als 10⁻¹ km². Dieses Ergebnis sollte von den Sozialwissenschaften aufgegriffen werden, indem untersucht wird, inwieweit sich die sozialen Strukturen in Abhängigkeit der physischen Ausdehnung eines morphologischen Slums ändern.

Sensitivitätsanalyse der Klassifikationsmethodik

Um die Sensitivität des Ergebnisses zu ermitteln, wird die oben beschriebene Methodik angewandt, in der jeweils zwei morphologische Slums, die einen Abstand von weniger als b_P voneinander aufwiesen, als ein Slum betrachtet werden³⁰. In Abbildung 4.5 sind die daraus resultierenden Größenverteilungen in Abhängigkeit der Puffer aufgetragen.

Die dunkelgrauen Histogramme beschreiben die ursprünglichen Daten ohne Puffer ($b_P = 0$ m), während die hellgrauen Balken die Größenverteilungen der modifizierten Daten repräsentieren ($b_P = 50$ m). Wie zu erwarten verschieben sich die Verteilungen hin zu größeren Werten, da die Verschmelzung zweier dicht beieinander liegender Siedlungen in einem größeren morphologischen Slum resultieren. Die dicken durchgezogenen Linien repräsentieren den geometrischen Mittelwert der jeweiligen Verteilung. Auch hier ist zu sehen, wie sich die Mittelwerte hin zu größeren Werten verschieben. Sehr deutlich ist die Verschiebung bei Dhaka zu sehen. Während der geometrische Mittelwert

²⁹Dies stellt eine starke Annahme dar, da die Bevölkerungsdichten in den morphologischen Slums in Südostasien weitaus höher, als beispielsweise in Südamerika sind. Weiterhin wird gezeigt [177], dass die Bevölkerungsdichte in diesen Siedlungen auch stark von deren Distanz zum jeweiligen Stadtzentrum abhängt.

³⁰FRIESEN U. A., „Sensitivity of slum size distributions as a function of spatial parameters for slum classification“, ([51], 2019)

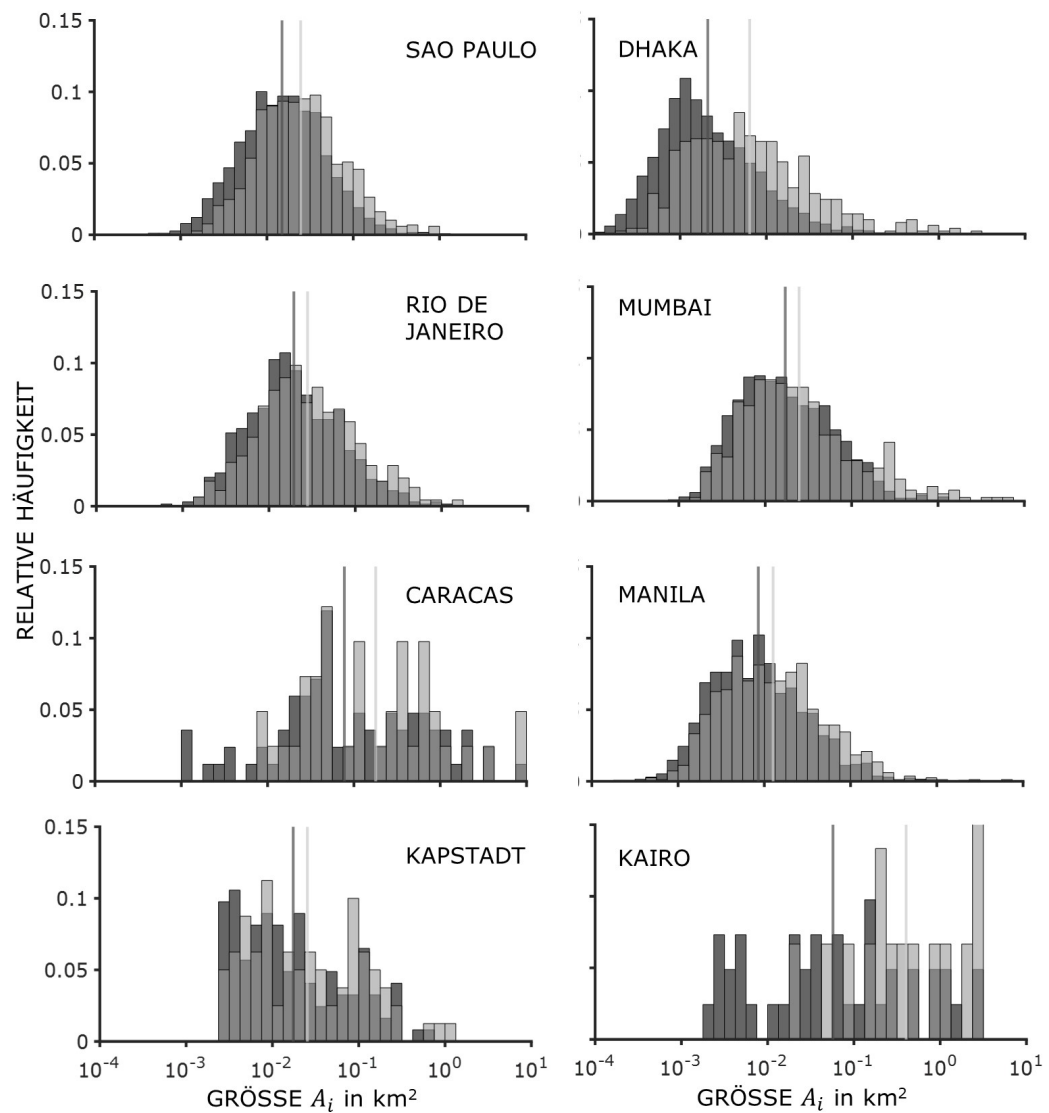


Abbildung 4.5 – Häufigkeitsverteilung morphologischer Slums in unterschiedlichen Städten in Abhängigkeit des auf die Polygone zugegebenen Puffers. Die dunkelgrauen Histogramme stellen die Häufigkeitsverteilung ohne Puffer ($b_P = 0$ m), die hellgrauen Histogramme die Verteilungen mit Puffer ($b_P = 50$ m) dar.

ursprünglich ($b_P = 0$ m) bei 0.0021 km^2 liegt, verdreifacht sich dieser bei einem hohen Puffer ($b_P = 50$ m) und liegt mit 0.0064 km^2 näher an den Mittelwerten der anderen beiden asiatischen Städten. Die geometrischen Mittelwerte aller betrachteten Städte sind in Tabelle 4.5 notiert. Die Werte bewegen sich weiterhin in der Größenordnung zwischen 10^{-3} und 10^{-1} km^2 .

Tabelle 4.5 – Geometrischer Mittelwert der Grundfläche morphologischer Slums in Abhängigkeit des Puffers b_p .

Stadt b_p in m	\hat{A} in km ²		
	0	5	50
Sao Paulo (Brasilien)	0.0150	0.0194	0.0246
Rio de Janeiro (Brasilien)	0.0195	0.0200	0.0280
Caracas (Venezuela)	0.0775	0.1081	0.1789
Dhaka (Bangladesch)	0.0021	0.0024	0.0064
Mumbai (Indien)	0.0171	0.0174	0.0247
Manila (Philippinen)	0.0085	0.0087	0.0126
Kapstadt (Südafrika)	0.0174	0.0178	0.0254
Kairo (Ägypten)	0.0572	0.0791	0.4031

Bei einem Puffer von $b_p = 5$ m besitzen 84.2% aller morphologischen Slums eine Größe zwischen 10^{-3} und 10^{-1} km², bei einem Puffer von $b_p = 50$ m 85.8%. Das Ergebnis, dass ein Großteil der morphologischen Slums in der Größenordnung um 10^{-2} km² liegt, ist also robust gegenüber der Klassifikationsmethodik. Weiterführende Analysen sind bei Friesen und anderen³¹ zu finden.

In dem hier angewendeten Verfahren bleibt die Landnutzung zwischen den einzelnen morphologischen Slums unberücksichtigt. Dies ist eine starke Annahme, denn ein zwischen zwei morphologischen Slums liegender Fluss stellt eine andere Art von Trennung dar, als ein Weg oder Grünland. Diese Einschränkung muss in zukünftigen Arbeiten berücksichtigt werden.

In einer weiteren Arbeit³² wird gezeigt, dass morphologische Slums in Sao Paulo ähnliche Größenverteilungen aufweisen, wie die im Brasilianischen Zensus von 2011 erfassten Daten der gleichen Stadt. Während im Zensus 87.6% der subnormalen Agglomerationen³³ eine Größe zwischen 10^{-3} km² und 10^{-1} km² aufweisen, sind es bei den morphologischen Slums 94.2%. Diese Unterschiede sind durch die Art der Erfassung zu erklären, wie Friesen und andere zeigen³². Weiterhin wird das hier beschriebene Ergebnis der

³¹FRIESEN U. A., „Sensitivity of slum size distributions as a function of spatial parameters for slum classification“, ([51], 2019)

³²FRIESEN U. A., „Size distributions of slums across the globe using different data and classification methods“, ([56], 2019)

³³vgl. Kapitel 2.3

morphologischen Slums von Dhaka mit einer alternativen morphologischen Klassifikation von Grübner und anderen³⁴ verglichen und dabei Ähnlichkeiten, sowie Unterschiede herausgearbeitet.

Einordnung

Mehr als 85% aller untersuchten morphologischen Slums weisen eine Größe zwischen 10^{-3} km² und 10^{-1} km² auf, wobei der geometrische Mittelwert aller untersuchten morphologischen Slums bei 0.0815 km² liegt. Obwohl die mittlere Größe in den jeweiligen Städten teils größer, und teils kleiner als der hier beschriebene Wert von 0.0815 km² ist, haben in allen Städten mehr als die Hälfte aller untersuchten morphologischen Slums eine Größe zwischen 10^{-3} km² und 10^{-1} km². Etwa 10% der beobachteten morphologischen Slums sind kleiner und 5% größer als der angegebene Bereich. In Kapitel 2 wird dargelegt, dass sich die Gesamtfläche³⁵ der Slums in einer Stadt und auch die Struktur und Form dieser Siedlungen mit der Zeit ändern³⁶. Trotz dieser Variabilität scheint die mittlere Größe der einzelnen morphologischen Slums unabhängig von der Zeit, Kultur, Kontinent oder dem untersuchten Land zu sein.

Dieses Ergebnis ist von Bedeutung für die Forschung zu morphologischen Slums. Häufig fokussieren sich die mediale Berichterstattung und wissenschaftliche Publikationen auf große und bekannte informelle Siedlungen (Dharavi in Mumbai, Kibera in Nairobi, Paraisopolis in Sao Paulo)³⁷. Dadurch wird der Großteil der anderen informellen Siedlungen in der Stadt und damit auch ein erheblicher Teil, der darin lebenden Bevölkerung vernachlässigt.

Ein ähnliches Phänomen ist bereits aus der Stadtwissenschaft bekannt. Zhu und andere³⁸ betonen, dass der große Teil der zukünftigen Urbanisierung nicht in den bekannten großen Megastädten mit jeweils mehr als 10 Millionen Einwohnern stattfinden wird, sondern in den mittelgroßen Städten mit einer Größe zwischen 500 000 und 2 000 000 Einwohnern. Es wird deshalb wiederholt darauf hingewiesen, dass der Fokus für eine nachhaltige Stadtplanung nicht alleine auf den großen bekannten Städten liegen darf, sondern sich stärker auf die mittelgroßen Städte verschieben muss. So ist ebenfalls davon auszugehen, dass ein großer Teil des informellen Siedelns nicht in den großen

³⁴GRUEBNER U. A., „Mapping the Slums of Dhaka from 2006 to 2010“, ([74], 2014)

³⁵KIT UND LÜDEKE, „Automated detection of slum area change in Hyderabad, India using multitemporal satellite imagery“, ([100], 2013)

³⁶HACHMANN, JOKAR ARSANJANI UND VAZ, „Spatial data for slum upgrading“, ([78], 2018)

³⁷Friesen und andere [48] zeigen Beispiele aus der medizinischen Forschung dafür auf.

³⁸ZHU U. A., „Understanding an urbanizing planet“, ([240], 2019)

informellen Siedlungen stattfindet, sondern in den morphologischen Slums im oben erwähnten Größenbereich. Die oben betonten mittelgroßen Städte sind aber auch in Hinblick auf die Erforschung von informellen Siedlungen wichtig, da in der vorliegenden Untersuchung alle Städte mehr als mindestens zwei Millionen Einwohner aufweisen und somit morphologische Slums, die in kleineren Städten liegen, in dieser Studie unberücksichtigt bleiben.

In weiteren Arbeiten sollte weiterhin verglichen werden, inwieweit die hier für morphologischen Slums identifizierten Ergebnisse auch auf andere Siedlungsklassen *armer* Bevölkerung innerhalb von Städten oder andere Siedlungsklassen im allgemeinen übertragen werden können.

4.2.2 Siedlungsdichte

Eine weitere Kennzahl morphologischer Slums in Städten ist die Dichte. In Tabelle 4.6 ist die Dichte, sowie die Fläche der gesamten Stadt und der morphologischen Slums für die oben erwähnten Gebiete dargestellt.

Tabelle 4.6 – Auflistung der Flächen der morphologischen Stadt nach Taubenböck und anderen [204], der Gesamtfläche der morphologischen Slums, sowie der Siedlungsdichte Φ .

Stadt	A_{Stadt} in km ²	A_{MS} in km ²	Φ in %
Sao Paulo (Brasilien)	2 251	55.2	2.45
Rio de Janeiro (Brasilien)	1 183	28.9	2.44
Caracas (Venezuela)	370	51.7	13.97
Dhaka (Bangladesch)	500	14.3	2.86
Mumbai (Indien)	988	41.4	4.19
Manila (Philippinen)	1 259	31.4	2.49
Kapstadt (Südafrika)	741	6.1	0.80
Kairo (Ägypten)	1 217	13.3	1.09

Die von den Städten eingenommenen Flächen liegen zwischen 370 km² (Caracas, Venezuela) und 2251 km² (Sao Paulo, Brasilien) und unterscheiden sich damit um fast eine Größenordnung voneinander. Die Gesamtfläche der morphologischen Slums in den untersuchten Städten schwankt zwischen 6.1 km² in Kapstadt, Südafrika und 55.2 km² in Sao Paulo, Brasilien. Die Siedlungsdichte der Stadt variiert zwischen 0.8% in Kapstadt und 13.97% in Caracas, wobei

dieser der einzig identifizierte Wert größer als 4.2% ist. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass bei einer Berücksichtigung der Townships in Kapstadt, die Siedlungsdichte einen Wert von 8.2% annimmt. Die Hälfte der untersuchten Städte zeigt dagegen eine Siedlungsdichte zwischen 2 und 3%. In Abbildung 4.6 sind die morphologischen Slums in den acht untersuchten Städten dargestellt. Während in Caracas ein mit 13.97% sehr großer Teil der Stadtfläche von morphologischen Slums bedeckt ist, ist es in Dhaka nur ein verhältnismäßig kleiner Teil (2.86%).

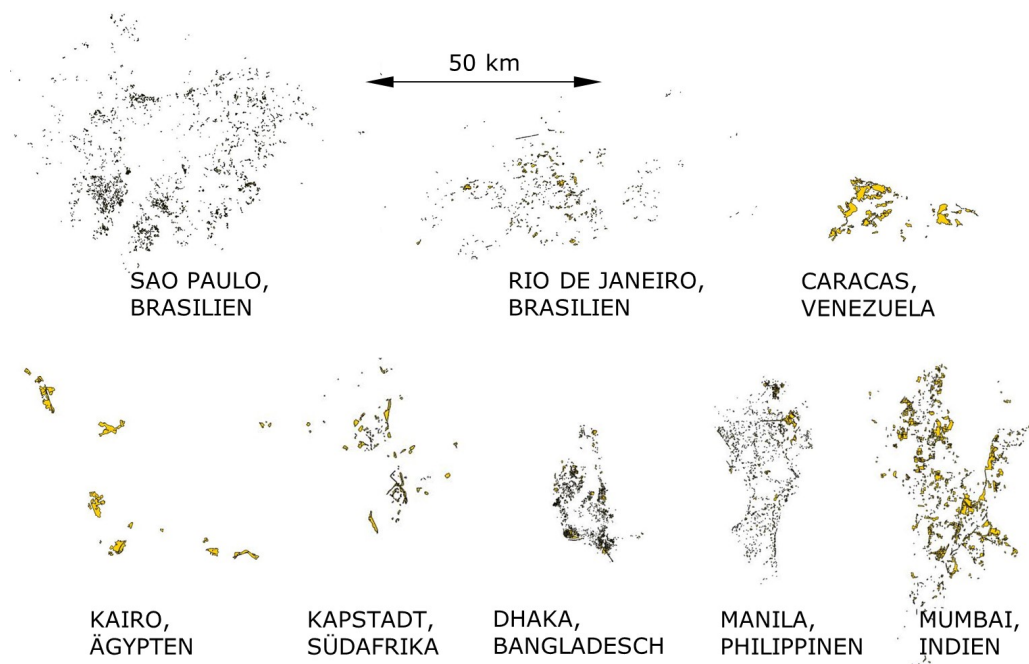


Abbildung 4.6 – Morphologische Slums in Sao Paulo, Rio de Janeiro, Caracas, Kairo, Kapstadt, Dhaka, Manila und Mumbai

Allerdings gehen Schätzungen davon aus³⁹, dass in Dhaka etwa 30% der 14 Millionen Einwohner, also etwa 4 Millionen Personen, in Slums wohnen, während die Gesamtbevölkerung von Caracas an sich nur 3 Millionen Menschen aufweist. Die Bevölkerungsdichte der Slums in Dhaka ist also weitaus höher. Ein Vergleich der morphologischen Slums in Sao Paulo, Rio de Janeiro, Manila und Dhaka zeigt, dass obwohl die Siedlungsdichte dieser vier Städte ähnlich ist, die morphologischen Slums in den untersuchten südostasiatischen Städten viel dichter beieinander liegen.

³⁹AHMED, „Factors in building resilience in urban slums of Dhaka, Bangladesh“, ([2], 2014)

4.2.3 Räumliche Verteilung

Die räumliche Anordnung, die durch die Distanz zum nächsten Nachbarn r_i quantifiziert werden kann, stellt eine weitere Skala zur Beschreibung urbaner Strukturen dar. In Abbildung 4.7 sind die Häufigkeitsverteilungen der nächsten Nachbarn der morphologischen Slums für die untersuchten Städte dargestellt.

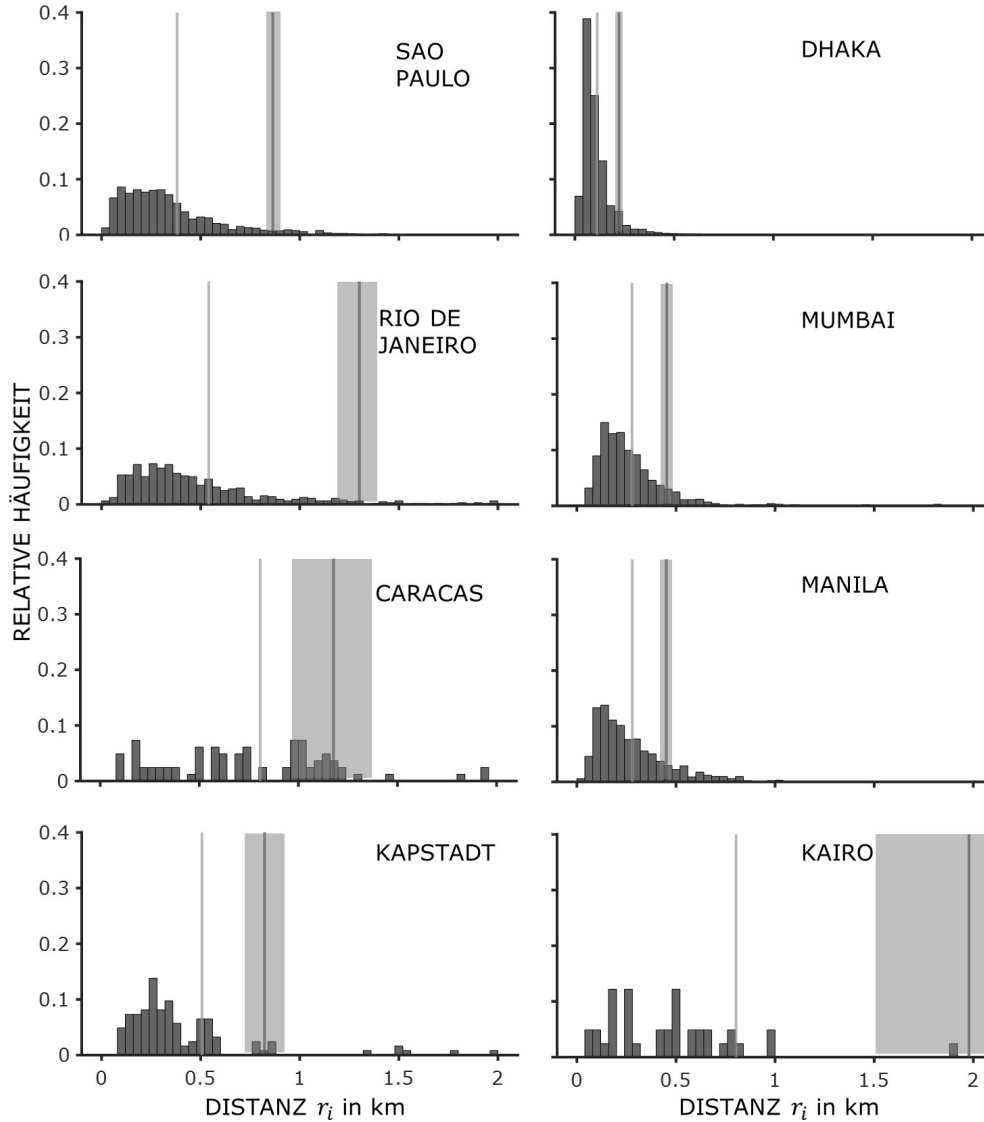


Abbildung 4.7 – Häufigkeitsverteilung des Abstands zum nächsten Nachbarn für die acht untersuchten Städte. Der hellgraue Balken beschreibt r_E , der dunkelgraue Balken r_A . Die transparente Fläche beschreibt das $3 \cdot \sigma_c$ -Intervall.

In die dargestellten Histogramme sind in hellgrau der durchschnittliche Ab-

stand zum nächsten Nachbarn r_E aufgetragen, während in dunkelgrau der durchschnittliche Abstand zum nächsten Nachbarn in einer zufällig generierten Punktverteilung r_A dargestellt ist. Die graue transparente Fläche zeigt die Standardabweichung $3\sigma_c$ an. Alle Werte links neben der Fläche zeigen damit eine geclusterte Anordnung an, alle Werte rechts davon eine regelmäßige Anordnung. Die Daten sind Tabelle 4.7 zu entnehmen. Dort ist weiterhin der Index R nach Clark und Evans aufgetragen.

Die Häufigkeitsverteilungen in Abbildung 4.7 zeigen, dass der mittlere Abstand zum nächsten Nachbarn der realen Verteilungen jeweils deutlich unter den Abständen einer zufälligen Punktverteilung liegt. Dies wird auch bei Betrachtung der Werte für R deutlich, die alle kleiner als 1 sind.

Tabelle 4.7 – Parameter zur Beschreibung der Regelmäßigkeit der morphologischen Slums in den untersuchten Städten

Stadt	r_E in km	r_A in km	R	z -Wert
Sao Paulo, Brasilien	0.381	0.864	0.442	-46.6
Rio de Janeiro, Brasilien	0.541	1.301	0.416	-28.4
Caracas, Venezuela	0.807	1.177	0.686	-5.4
Dhaka, Bangladesch	0.112	0.222	0.505	-43.6
Mumbai, Indien	0.278	0.454	0.613	-23.4
Manila, Philippinen	0.280	0.451	0.621	-26.7
Kapstadt, Südafrika	0.507	0.822	0.617	-8.1
Kairo, Ägypten	0.803	1.978	0.406	-7.3

Alle hier dargestellten Werte zeigen, dass die morphologischen Slums innerhalb aller untersuchter Städte in Clustern angeordnet sind und sich stark von einer zufälligen Anordnung unterscheiden. Die z -Werte bestätigen die hohe Signifikanz dieser Ergebnisse.

In den südamerikanischen Städten Caracas, Sao Paulo und Rio de Janeiro weisen die morphologischen Slums größere Abstände r_i zu ihrem jeweiligen nächsten Nachbarn auf, als in südostasiatischen Städten Manila, Mumbai und Dhaka. Die mittleren Abstände in den zuletzt genannten Städten liegen jeweils unter 300 m. Die Abstände in den beiden afrikanischen Städten Kairo und Kapstadt liegen in derselben Größenordnung wie die der südamerikanischen Städte.

Wird die Breite der Verteilungen in Abbildung 4.7 betrachtet, so ergibt sich ein ähnliches Bild. Auch hier weisen die drei asiatischen Städte die geringsten

Werte auf, während die Abstände in den südamerikanischen und afrikanischen Städten stärker streuen.

Die hier vorgestellten Untersuchungen beziehen sich immer auf die jeweils untersuchte Stadt als Ganzes. Es ist möglich, diese Untersuchung für kleinere Ausschnitte einer Stadt durchzuführen, wie Hartig, Friesen und Pelz⁴⁰ zeigen. Sie teilen die Städte in kleinere Abschnitte auf und ermitteln die Regelmäßigkeit für diese Abschnitte. Dabei ist zu beobachten, dass sich die morphologischen Slums innerhalb der kleineren Abschnitte zwar in manchen Bereichen der betrachteten Städte zufällig verteilen ($R \approx 1$), dass auf kleinerer Skala ebenfalls keine regelmäßige Anordnung morphologischer Slums identifiziert werden kann. Die Arbeit von Hartig, Friesen und Pelz⁴⁰ vergleicht die Anordnung von Slums allerdings nur in zwei Städten (Rio de Janeiro und Dhaka). Diese Analyse sollte in zukünftigen Arbeiten für die hier beschriebenen Städte untersucht werden, um die intra-urbane Struktur der Städte detaillierter zu analysieren⁴¹.

⁴⁰HARTIG, FRIESEN UND PELZ, „Spatial relations of slums“, ([80], 2019)

⁴¹Dafür können beispielsweise Methoden der Clusteranalyse [179] angewandt werden.

Kapitel 5

Diskussion

The measure of greatness in a scientific idea is the extent to which it stimulates thought and opens up new lines of research.

Paul Dirac¹

Das in Kapitel 3 entwickelte Modell beschreibt die Entstehung informeller Siedlungen durch die Interaktion von *armen* und *reichen* Bewohnern einer Stadt in Form einer Turing-Instabilität und deren sich stark unterscheidendem Migrationsverhalten.

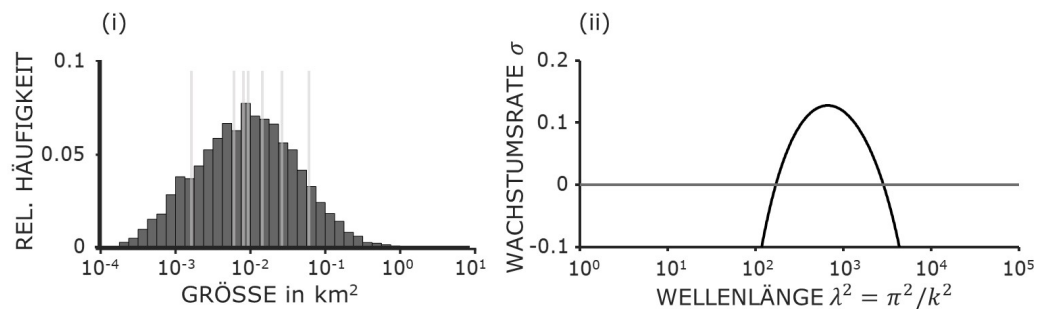


Abbildung 5.1 – Vergleich der (i) Größenverteilung aller in Kapitel 4 untersuchten morphologischen Slums mit der (ii) Dispersionsrelation, des in Kapitel 3 entwickelten Modells. Die in der Größenverteilung eingezeichneten Striche kennzeichnen die Mittelwerte der in Kapitel 4 untersuchten Städte. Die zur Erstellung der Dispersionsrelation verwendeten Werte finden sich in Tabelle A.1.

Eine lineare Stabilitätsanalyse des durch Differentialgleichungen beschreibbaren Modells zeigt, dass nur eine bestimmte Bandbreite an Wellenlängen

¹ 1902-1984, Britischer Physiker und Nobelpreisträger für Physik 1933.

angeregt wird (Abbildung 5.1, rechts) und damit ausschließlich Strukturen bestimmter Größe und bestimmten Abstands entstehen können.

Die empirischen Untersuchungen in Kapitel 4 zeigen dagegen die Häufigkeitsverteilung (Abbildung 5.1, links) von mehr als 7000 morphologischen Slums in acht Städten auf drei Erdteilen. Diese weisen eine Anordnung ähnlich einer logarithmischen Normalverteilung mit einem Mittelwert von 0.0814 km^2 auf. In Abbildung 5.1 sind zusätzlich die Mittelwerte der Häufigkeitsverteilungen der morphologischen Slums in den acht untersuchten Städte aufgetragen, die sich um das globale Mittel gruppieren.

Sowohl das vorgestellte Modell, als auch die ermittelten Ergebnisse der empirischen Analyse werden im Folgenden in vier Schritten detailliert diskutiert. Zunächst wird das Modell systematisch bewertet (Abschnitt 5.1). Für die Bewertung dient die Sichtweise von Heinrich Hertz^{2,3} als Vorbild, der Modelle hinsichtlich *Korrektheit*, *Zulässigkeit* und *Zweckmäßigkeit* untersuchte. Im zweiten Schritt (Abschnitt 5.2) wird das Modell zudem erkenntnistheoretisch eingeordnet⁴. Dabei wird vor allem die Frage reflektiert, inwieweit menschliches Verhalten durch physikalisch motivierte Modelle beschreibbar ist. Im dritten Schritt (Abschnitt 5.3) werden auf Basis der vorangegangenen Bewertungen mögliche Modellerweiterungen, sowie Anwendungen der Ergebnisse im Bereich der Infrastrukturplanung vorgestellt. Abschließend wird (Abschnitt 5.4) die in dieser Arbeit eingenommene Perspektive auf den Prozess der Modellbildung auf Basis der erzielten Ergebnisse und im Kontext der bestehenden Forschung reflektiert.

5.1 Modellbewertung

Um ein Modell zu bewerten, bieten sich unterschiedliche Qualitätskriterien an. Hertz² beschreibt neben der Korrektheit eines Modells noch dessen Zulässigkeit und Zweckmäßigkeit als maßgeblich:

- (i) Die **Korrektheit** eines Modells bemisst, inwieweit die Beziehungen innerhalb des Modells den Beziehungen der äußeren Dinge entsprechen, die von dem Modell beschrieben werden.
- (ii) Mit der **Zulässigkeit** wird beurteilt, inwieweit im Modell Widersprüche gegen Gesetze unseres Denkens und der Logik vorhanden sind.

² HERTZ, *Die Prinzipien der Mechanik: In neuem Zusammenhange dargestellt, Gesammelte Werke*, ([86], 1894)

³ PELZ U. A., *Mastering Uncertainty in Mechanical Engineering*, ([156], 2021)

⁴ RAPOPORT, „Lewis F. Richardson’s mathematical theory of war“, ([170], 1957)

- (iii) Die **Zweckmäßigkeit** beschreibt die Fähigkeit des Modells, das zu beschreibende System in einer möglichst einfachen Weise und mit einer möglichst geringen Anzahl leerer Beziehungen zu erfassen.

5.1.1 Korrektheit

Das Ziel der Modellbildung ist der Abgleich der Modellergebnisse mit einem Zielobjekt. Bezogen auf das in der Einleitung vorgestellte Konzept der Modellbildung als Abfolge von *Abduktion*, *Deduktion* und *Induktion* wird im Folgenden untersucht, ob die aus dem Modell deduzierten Schlussfolgerungen des Modells der messbaren Realität entsprechen.

Das Resultat des Modells ist die durch die Interaktion zweier sozialer Gruppen resultierende Anregung von Mustern in einem bestimmten Größenbereich, wie in Abbildung 5.1 dargestellt. Die charakteristische Größe dieser Muster ist deren Wellenlänge λ . Das entstehende Dichtefeld der Bevölkerung ist durch einen Schwellwert ϑ mit der typischen Größe l_M einer informellen Siedlung verbunden. Ein konstanter Schwellwert in Kombination mit räumlich konstanten Parametern führt zu binären Mustern (i) identischer Größe und (ii) identischem Abstand. Der Fokus der folgenden Analyse liegt deshalb auf diesen beiden charakteristischen Größen, die für die Planung von Infrastrukturen notwendig sind. Einerseits werden dafür die räumlichen, andererseits die zeitlichen Eigenschaften von Modell und Empirie miteinander verglichen. Sowohl im Falle der Turing-Muster, als auch der Abbildung der morphologischen Slums sind binäre zweidimensionale Muster das Untersuchungsobjekt.

Der Vergleich von Modell und Empirie wird unter Anwendung der in Kapitel 4 eingeführten Methoden zur Ermittlung der Größe der Objekte A und ihrer Regelmäßigkeit R durchgeführt. Die Dichte Φ , also das Verhältnis der Summe der Flächen der Objekte zur Gesamtfläche, wird im Folgenden nicht betrachtet. Das ist darin begründet, dass die Dichte im Modell vor allem vom gewählten Schwellwert ϑ abhängig ist und in beliebiger Weise auf den in den empirischen Daten beobachteten Wert Φ angepasst werden kann (vgl. Abbildung 3.4). Der Vergleich beschränkt sich außerdem auf die Schwerpunkte der modellierten binären Konzentrationsmuster und der morphologischen Slums.

Räumliche Analyse morphologischer Slums und Turing-Muster

In Abbildung 5.2 sind neben einem (i) Turing-Muster die zweidimensionalen Muster morphologischer Slums in (ii) Caracas (Venezuela) und (iii) Sao Paulo (Brasilien) abgebildet. Das Turing-Muster ist identisch mit dem in Abbildung 3.4 dargestellten Muster mit einem Schwellwert von $\vartheta = 6$. In der Simulation werden räumlich konstante Parameter verwendet. Um die Ver-

gleichbarkeit zu erhöhen, werden sowohl der Abstand zum nächsten Nachbar, als auch die Größe der jeweils betrachteten Objekte mit der Gesamtfläche A_{Ges} entdimensioniert, die von dem Rechteck gebildet wird, das alle Objekte umschließt.

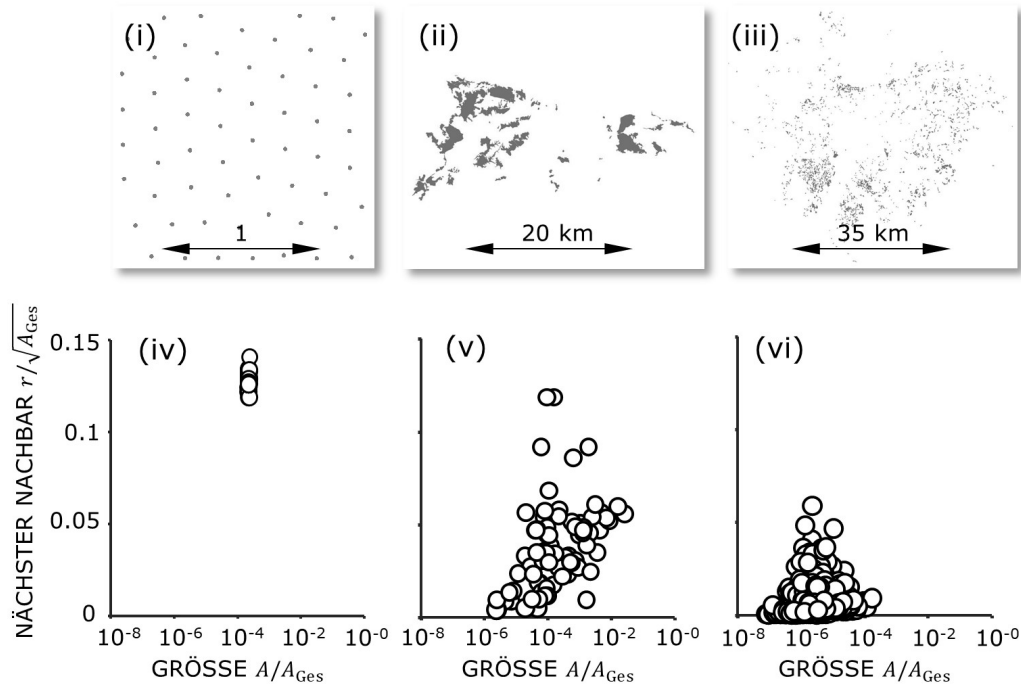


Abbildung 5.2 – (i) Darstellung der räumlichen Anordnung der Konzentrationsverteilung eines Turing Musters (Informationen zu Simulation in Tabelle A.2) und der räumlichen Anordnung der morphologischen Slums in (ii) Sao Paulo (Brasilien) und (iii) Caracas (Venezuela). Die Objekte sind der jeweiligen Objektgröße nach gewichtet. Die Größen der Objekte im Verhältnis zur Gesamtfläche sind in Bild (iv) für das Turing-Muster und in Bild (v,vi) für die Anordnung der morphologischen Slums aufgetragen.

Bereits visuell werden die Unterschiede zwischen Modell und Empirie deutlich. Die Konzentrationsverteilung der Reaktions-Diffusions Gleichung ist weitaus regelmäßiger, als die empirischen Verteilungen der morphologischen Slums. Der Vergleich von R in Tabelle 5.1 bestätigt dies. Im Falle der morphologischen Slums in Sao Paulo indiziert der Wert $R = 0.442$ eine stark geclusterte Anordnung⁵, ebenso in Caracas mit einem Wert von $R = 0.686$. Beide Werte sind mit einem niedrigen z -Wert verbunden, der weit unter dem

⁵ Wie bereits in Kapitel 4 dargestellt, sind die morphologischen Slums auch in allen anderen untersuchten Städten geclustert.

in Kapitel 4 erwähnten $3 \cdot \sigma_A$ -Intervall liegt. Ein Vergleich mit denen im Anhang dargestellten Siedlungskarten (Abbildung A.1) zeigt weiterhin, dass die Anordnung stark von der lokalen Topographie abhängt. Sowohl in Sao Paulo, als auch in Caracas sind viele der Siedlungen an Berghängen zu finden. Andere morphologische Slums sind wiederum durch Seen begrenzt.

Im Gegensatz dazu variieren die Abstände zwischen den einzelnen Objekten im Fall des Turing-Musters nur minimal und resultieren in einem Wert von $R = 1.982$. Auch hier ist mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit von einer regelmäßigen Anordnung auszugehen. Diese ähnelt einer hexagonalen Anordnung⁶. Während die Grundflächen der morphologischen Slums sich über einige Größenordnungen erstrecken (Abbildung 5.2, (v,vi)), wie bereits in Kapitel 4 dargestellt, sind die Flächen der Objekte im Turing-Muster nahezu identisch. Auch ist mithilfe des Modells nur eine Darstellung rotationssymmetrischer Objekte möglich. Die komplexen und vielfältigen Formen morphologischer Slums, die beispielsweise entlang von Bahngleisen oder Flussläufen entstehen und eine längliche Form aufweisen, können nicht abgebildet werden.

Tabelle 5.1 – Vergleich zwischen der Anordnung einer Turing-Instabilität mit den Anordnungen morphologischer Slums in Sao Paulo und Caracas. Die Werte r_E und r_A sind mit der alle morphologischen Slums umschließenden Gesamtfläche A_{Ges} entdimensioniert.

	R	$r_E/\sqrt{A_{\text{Ges}}}$	$r_A/\sqrt{A_{\text{Ges}}}$	z -Wert
Turing Instabilität	1.982	0.129	0.065	14.42
Caracas (Venezuela)	0.686	0.038	0.055	-5.44
Sao Paulo (Brasilien)	0.442	0.005	0.012	-46.55

Die räumliche Verteilung morphologischer Slums wird durch ein Turing-Modell mit räumlich homogenen Parametern unzureichend abgebildet. Zwar wäre die Anpassung des Modells an kleinere Regionen innerhalb einer Stadt möglich, um anstelle der Gesamtzahl aller morphologischen Slums nur einen Ausschnitt zu betrachten. Allerdings haben Hartig, Friesen und Pelz⁷ gezeigt, dass Slums auch in kleineren Regionen der Stadt nicht regelmäßig, sondern geclustert oder zufällig verteilt sind und somit dem Modell widersprechende Anordnungen aufweisen.

Eine mögliche Erklärung für die Unterschiede zwischen Modell und Empirie ist, dass der Schwellwert ϑ in der zeitlichen Entwicklung der Turing-Muster

⁶ Ein vollständiges regelmäßiges Muster einer hexagonalen dichtesten Packung würde in dem dargestellten Diagramm (Abbildung 5.1 (iv)) zu einem einzelnen Punkt führen.

⁷ HARTIG, FRIESEN UND PELZ, „Spatial relations of slums“, ([80], 2019)

zu schnell überschritten wurde. Es konnte sich kein regelmäßiges Muster ausprägen, sondern die physische Gebäudestruktur wurde in einem frühen Stadium der Entwicklung eines Turing-Musters festgelegt. Dies wird durch Abbildung 3.5 ($t = 0.6$) gestützt. Aus diesem Grund wird im Folgenden die zeitliche Entwicklung des Modells und morphologischer Slums detaillierter untersucht.

Zeitliche Analyse morphologischer Slums und Turing-Muster

Nicht jedes Muster, das durch seine regelmäßige Anordnung einem Turing-Muster ähnelt, ist zwangsläufig das Resultat einer Turing-Instabilität. Obwohl die räumliche Verteilung eines Musters zunächst geeignet scheint, um dieses als Resultat einer Turing-Instabilität zu identifizieren, stellt nach Kondo und Miura⁸ die zeitliche Entwicklung des räumlichen Musters das maßgebliche Kriterium dar, durch das eine Turing-Instabilität identifiziert werden kann. Die Autoren veranschaulichen eine solche Untersuchung an folgendem Beispiel: Um zu zeigen, dass die Anordnung von Pigmenten in Zebrafischen das Resultat einer Turing-Instabilität ist, werden einem Zebrafisch durch Laserablation ein Teil der Farbpigmente entfernt, so dass sich die Konzentrationsverteilung der Pigmente in diesem Bereich ändert. Die sich im Anschluss an diesen Eingriff neu entwickelte Konzentrationsverteilung folgt der mithilfe eines Turing-Modells prognostizierten Verteilung. Dadurch kann der zugrundeliegende Mechanismus der Musterbildung in der Fischhaut als Turing-Instabilität identifiziert werden.

Diese Art einer quantitativen Untersuchung der zeitlichen Entwicklung morphologischer Slums ist nicht möglich. Einerseits, weil die Siedlungen nicht von ihrer Umgebung getrennt und somit keine Analysen unter Laborbedingungen durchgeführt werden können. Andererseits sind keine Analysen der zeitlichen Entwicklung morphologischer Slums mit einer hohen zeitlichen Auflösung auf einer stadtweiten Ebene bekannt. Die bisher vorhandenen Analysen^{9,10} betrachten vor allem Ausschnitte einer Stadt.

Die erwähnten Studien^{9,10} können allerdings verwendet werden, um die zeitliche Entwicklung eines Aktivator-Substrat Modells auf einer qualitativen Ebene mit der Entwicklung morphologischer Slums zu vergleichen. Abbildung 5.3 verdeutlicht dies.

⁸ KONDO UND MIURA, „Reaction-Diffusion Model as a Framework for Understanding Biological Pattern Formation“, ([105], 2010)

⁹ KRAFF, WURM UND TAUBENBÖCK, „The dynamics of poor urban areas - analyzing morphologic transformations across the globe using Earth observation data“, ([110], 2020)

¹⁰ LIU, KUFFER UND PERSELLO, „The Temporal Dynamics of Slums Employing a CNN-Based Change Detection Approach“, ([125], 2019)

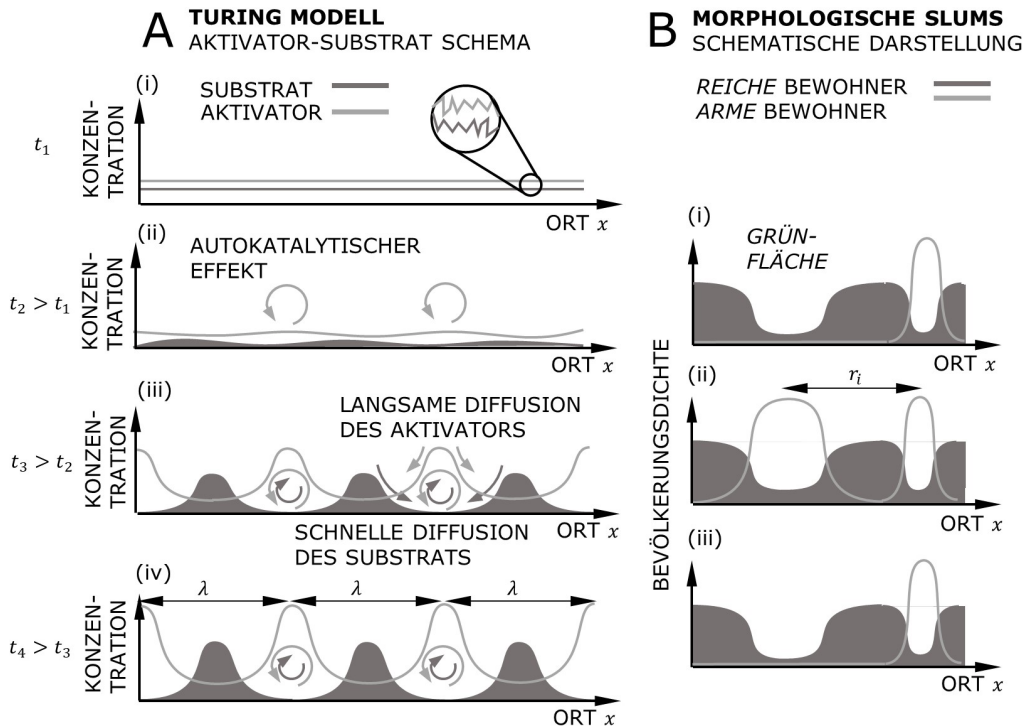


Abbildung 5.3 – **A** Schematische Darstellung der Entstehung eines Turing-Musters in einem Aktivator-Substrat Modell. **B** Schematische Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Bevölkerungsdichte vor der Entstehung und nach der Räumung einer informellen Siedlung nach Liu und anderen [125].

Die Analyse¹⁰ zeitlich aufgelöster Satellitendaten morphologischer Slums in Bangalore (Indien) zeigt, dass städtische Freiflächen (B,(i)) verwendet werden, um informelle Siedlungen zu errichten, was zu einer erhöhten Dichte *armer* Bevölkerung führt (B,(ii)). Einige dieser Siedlungen wurden aber nach wenigen Monaten wieder geräumt bzw. aufgelöst (B,(iii)), ohne dass dies einen Effekt auf die umliegenden Gebäude und deren Bewohner ausgeübt hätte. Diese Art der Auflösung informeller Siedlungen kann auch in anderen Regionen der Erde beobachtet werden¹¹. Dagegen beeinflussen sich bei einer Turing-Instabilität die beiden Morphogene gegenseitig (A,(ii)-(iv)), indem eine Erhöhung der Aktivatorkonzentration mit einer Verminderung der Substratkonzentration verbunden ist. Dies wird durch die Reaktionsgleichungen beschrieben. Die beiden Bevölkerungsdichten sind dagegen scheinbar nicht zwangsläufig mitein-

¹¹So fanden im Rahmen der Vorbereitung der Fußball-Weltmeisterschaften im Jahr 2014 und den Olympischen Spielen im Jahr 2016 in Rio de Janeiro ebenfalls Zwangsräumungen solcher Siedlungen statt [134].

ander gekoppelt, wie im Modell durch die Reaktionsterme f_i vorgeschlagen, da sie sich teilweise unabhängig voneinander verhalten. Diese Beobachtungen stellen deshalb in Frage, ob die Interaktion zwischen den beiden Gruppen in einer ähnlichen Weise miteinander gekoppelt ist, wie es für die Ausbildung einer Turing-Instabilität notwendig wäre.

Diese Kritik könnte durch eine Anpassung des Modells aufgehoben werden. Gegebenenfalls sind die Morphogene in einer Stadt nicht *reiche* und *arme* Bewohner, sondern gegebenenfalls ist ein grundlegender Mechanismus die Interaktion zwischen Einwohnern und unbebauter Stadtfläche. So zeigen Fuller und Gaston¹² in einer Analyse europäischer Städte, dass die Summe der Grünflächen in einer Stadt mit der Gesamtfläche der jeweiligen Stadt korreliert und das Ziel von Stadtplanern ist, allen Bewohnern Grünflächen in der Nähe ihres Wohnortes zu Verfügung zu stellen. Eine regelmäßige Verteilung von Grünflächen würde diese Zielvorgabe erfüllen. Zur Beschreibung eines solchen Mechanismus muss allerdings die Verhaltensmatrix angepasst und anstelle der Interaktion zweier Bevölkerungsgruppen die Interaktion zwischen Bevölkerung und freiem Land abgebildet werden.

Ein letzter Unterschied in der zeitlichen Entwicklung von morphologischen Slums und Aktivator-Substrat Modellen besteht darin, dass sich die Konzentrationsspitzen während der Musterausbildung voneinander wegbewegen und sich aufteilen¹³ (vgl. Abbildung 3.5). Dieser Vorgang wird bei morphologischen Slums nicht beobachtet.

Zusammenfassung

Ein Vergleich des Modells mit den in Kapitel 4 identifizierten Erkenntnissen bestätigt die Aussage, dass informelle Siedlungen eine global unabhängige Skala entwickeln. Allerdings ist diese global unabhängige Größe die Fläche der Siedlungen und nicht deren Abstand zur nächstgelegenen Siedlung. Eine Siedlungsverteilung mit Objekten ähnlicher Größe aber davon unabhängigem Abstand zum nächsten Nachbar wird im Modell nicht abgebildet.

Das in Kapitel 3 vorgestellte Modell mit räumlich homogenen Parametern kann somit die real beobachteten Siedlungsverteilungen nicht abbilden. Während die Größe der Objekte im Modell nicht streut und die resultierende Häufigkeitsverteilung sich auf einen kleinen Bereich beschränkt, ist bei morphologischen Slums eine Streuung um zwei Größenordnungen zu beobachten. Gleichzeitig sind die morphologischen Slums in den untersuchten Städten

¹²FULLER UND GASTON, „The scaling of green space coverage in European cities“, ([59], 2009)

¹³MEINHARDT, „Turing’s theory of morphogenesis of 1952 and the subsequent discovery of the crucial role of local self-enhancement and long-range inhibition“, ([139], 2012)

geclustert ($R < 1$) und nicht regelmäßig über die Stadtfläche verteilt, wie im Modell prognostiziert ($R > 1$). Auch bei der Analyse kleinerer Gebiete innerhalb von Städten wird beobachtet, dass die Siedlungen nicht regelmäßig, sondern geclustert oder zufällig verteilt sind¹⁴.

Daneben zeigt die Analyse der zeitlichen Entwicklung morphologischer Slums und Turing-Instabilitäten weitere Unterschiede. Diese legen nahe, dass die Bevölkerungsdichten der beiden Bevölkerungsgruppen nicht zwangsläufig miteinander gekoppelt sind.

5.1.2 Zulässigkeit

Die starken Abweichungen zwischen Modell und Empirie stellen die Frage, inwieweit die zu Beginn der Modellierung in Kapitel 3 getätigten Annahmen gerechtfertigt sind. Deren Zulässigkeit wird deshalb im Folgenden untersucht, sowie der Frage nach gegebenenfalls im Modell vorhandenen Inkonsistenzen oder Widersprüchen nachgegangen.

Einteilung in soziale Gruppen

Das Modell (Kapitel 3) beruht auf der Grundannahme, dass sich die Bevölkerung einer Stadt, basierend auf dem jeweiligen Einkommen der Individuen, in zwei soziale Gruppen einteilen lässt. Diese dichotome Kategorisierung wird verwendet, da sie einerseits die physische Wirklichkeit vieler Städte im globalen Süden abbildet¹⁵ und andererseits auch in anderen Studien zur Analyse urbaner Systeme verwendet wird¹⁶. Diese Einteilung ist aus zwei Perspektiven diskussionswürdig: (i) soziologisch und (ii) modellinhärent.

(i) In der Literatur^{17,18} wird wiederholt darauf hingewiesen, dass einfache dichotome Klassifikationen von Bevölkerungsgruppen problematisch sind und als wertend empfunden werden. Personen, Personengruppen, ganze Städte oder Nationen werden auf ein einziges Merkmal reduziert und anhand dieses Merkmals kategorisiert. Die im Fall des Modells durchgeführte Reduktion von Personen oder Gruppen auf die Kategorie *arm* ist dabei eine Ausübung von

¹⁴HARTIG, FRIESEN UND PELZ, „Spatial relations of slums“, ([80], 2019)

¹⁵LILFORD U. A., „Because space matters“, ([123], 2019)

¹⁶CHAUVIN U. A., „What is different about urbanization in rich and poor countries?“, ([28], 2017)

¹⁷SMALL, „De-Exoticizing Ghetto Poverty“, ([197], 2015)

¹⁸GROVE UND ZWI, „Our health and theirs“, ([72], 2006)

Macht und kann als eine Form epistemischer Gewalt verstanden werden¹⁹.

(ii) Auch wenn die Unterscheidung in zwei Kategorien (*arm* und *reich*) zunächst sinnvoll erscheint, bleibt offen, wie diese im konkreten Fall²⁰ durchgeführt wird. Diese Frage ist aus der Armutsforschung²¹ bekannt und führt zu der Unterscheidung zwischen relativer und absoluter Armut²². Im Modell wird bisher nicht definiert, welches der beiden Konzepte von Armut angewendet wird. Durch die sich stark unterscheidenden Lebensbedingungen von Bewohnern informeller Siedlungen in unterschiedlichen Ländern²³ erscheint das Konzept der relativen Armut angemessen.

Die im Modell vorgenommene Einteilung der Bevölkerung in zwei Gruppen impliziert, dass sich die in der *Verhaltensmatrix* beschriebenen Verhaltensmerkmale von Personengruppen, ausschließlich aufgrund von deren Wohlstand ändern. Während sich laut dem Modell *reiche* Personen gegenseitig abstoßen $a_{22} < 0$, ziehen *arme* Personen einander an $a_{11} > 0$. Alternative Motivationen für menschliches Verhalten werden dabei nicht berücksichtigt. Diese Beschreibung führt weiterhin dazu, dass das Verhalten von Personen sich in der Nähe der Armutsgrenze sprunghaft ändert und ansonsten unabhängig vom Einkommen konstant bleibt. Eine solche dichotome Einteilung wird dem menschlichen Verhalten nur unzureichend gerecht.

Zwar lässt sich die physische Bebauungsstruktur, wie in Kapitel 4 gezeigt, in zwei Klassen einteilen, die Einkommensverteilungen der Einwohner dieser Siedlungen weisen aber ein breiteres Spektrum auf²⁴. Dies zeigt sich auch in der Analyse der Einkommensverteilung der Weltbevölkerung, die in Abbildung 5.4 dargestellt ist. Während die weltweite Einkommensverteilung aus dem Jahr 1975 zwei lokale Maxima aufweist und eine Einteilung der Bevölkerung in *arm* und *reich* anhand des dazwischenliegenden Minimums dazu führt, dass ein verhältnismäßig kleiner Anteil der Gesamtbevölkerung ein Einkommen nahe der Armutsgrenze aufweist, hat sich die Lücke zwischen beiden Maxima

¹⁹BRUNNER, „Das Konzept epistemische Gewalt als Element einer transdisziplinären Friedens- und Konflikttheorie“, ([22], 2016, Als weiterführende Literatur sei auf Arbeiten Foucaults verwiesen [96])

²⁰Damit ist das Modell aus Kapitel 3 und die Studie von Chauvin und anderen [28] gemeint.

²¹MADDEN, „Relative or absolut poverty lines“, ([128], 2000)

²²Während im Konzept der relativen Armut diejenigen Teile der Bevölkerung zusammengefasst werden, deren Vermögen in einem bestimmten unteren Perzentil der Vermögensverteilung liegt, ist absolute Armut dadurch definiert, dass die jeweilige Person oder Gruppe weniger als einen bestimmten Geldbetrag pro Tag zur Verfügung hat. Derzeit liegt dieser Wert bei 1.9 \$ pro Tag.

²³EZEH U. A., „The history, geography, and sociology of slums and the health problems of people who live in slums“, ([46], 2017)

²⁴MAHABIR U. A., „The study of slums as social and physical constructs“, ([130], 2016)

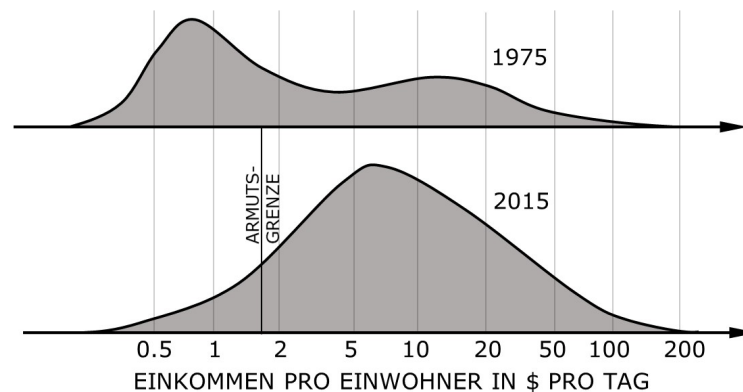


Abbildung 5.4 – Qualitative Darstellung der weltweiten Einkommensverteilung in den Jahren 1975 und 2015 nach Roser [181]. Die Armutsgrenze liegt im Jahr 2015 bei 1.9 \$ pro Tag.

zum Jahr 2015 hin zu größeren Einkommen geschlossen²⁵. Dies erschwert eine systematische Begründung der Wahl der Armutsgrenze.

Anhand dieses kontinuierlichen Verlaufs der Einkommensverteilung wird begründet²⁶, dass sich auch die Lebensumstände und damit das Verhalten der Menschen in Abhängigkeit von dem ihnen zur Verfügung stehenden Kapital kontinuierlich verändert. Rosling, Rosling und Rönnlund²⁶ schlagen deshalb eine Einteilung anhand des Einkommens in mindestens vier Klassen vor.

Zwar kann die Einteilung der Bevölkerung auf eine größere Anzahl an Gruppen erweitert werden, dies ruft aber auch eine höhere Anzahl an Interaktionsmöglichkeiten zwischen den Bevölkerungsgruppen hervor. Diese müssten im Modell in der Verhaltensmatrix berücksichtigt werden, was deren Komplexität enorm erhöhen und die Nachvollziehbarkeit möglicher Modellresultate verringern würde.

Es bleibt somit offen, ob und anhand welcher Grenze zwischen *armer* und *reicher* Bevölkerung unterschieden werden kann. Durch diese fehlende Definition ist es nicht möglich, den jeweiligen Gruppen spezifische Eigenschaften zuzuordnen, was wiederum dazu führt, dass mit dem Modell keine quantitativen Aussagen getätigt werden können²⁷.

²⁵ROSER, „Global Economic Inequality“, ([181], 2013)

²⁶ROSLING, ROSLING UND RÖNNLUND, *Factfulness*, ([182], 2019)

²⁷Es wäre alternativ möglich die Bevölkerungsgruppen nach der Art ihrer Wohnsituation in *Arm* und *Reich* einzuteilen. Damit würde aber das Ergebnis des Modells, die Bebauungsstruktur, zu dessen wichtigstem Eingangsparameter werden und ein Zirkelschluss entstehen.

Beschreibung der Interaktion

Im Anfangsstadium der diffusionsgetriebenen Instabilität wird angenommen, dass die Bevölkerungsdichten beider sozialer Gruppen unabhängig vom Ort $U_i \neq U_i(x_j)$ konstant sind, beide Gruppen perfekt durchmischt sind und miteinander interagieren. Diese Annahme wird in Analogie zu chemischen oder biologischen Prozessen verwendet, für deren Beschreibung das Modell der Turing-Instabilität ursprünglich entwickelt wurde²⁸.

Während die Interaktion der Morphogene in chemischen Systemen in Lösungen stattfindet²⁹ und durch Reaktionsgleichungen beschrieben werden kann³⁰ sind die Analogien zu diesen Lösungen und der Reaktionsgleichung in dem vorgestellten Modell unbekannt. Zwar ist die grundsätzliche Art der Interaktion beider Bevölkerungsgruppen durch Studien belegt und in der Verhaltensmatrix $a_{ij} = \partial f_i / \partial u_j$ in Form einer Aktivator-Substrat Kinetik beschrieben, eine quantitative Definition von f_i ist allerdings nicht vorhanden und deren exakte mathematische Formulierung schwierig zu ermitteln.

Dies hat zwei Gründe: (i) Die Reaktionskinetik beschreibt die Fernmigration, die entsprechend der in Kapitel 3 vorgegebenen Definition sowohl Geburten-, als auch Sterberaten für die beiden sozialen Gruppen enthalten muss. Durch die im Modell nicht explizit definierte Armutsgrenze, können den beiden Gruppen bisher allerdings keine quantitativen Geburten- oder Sterberaten zugeordnet werden, wodurch wiederum die Reaktionskinetik f_i nicht quantitativ beschrieben werden kann.

Folgender zweiter (ii) Grund ist allerdings weitreichender. Die Morphogene werden im Modell als *arme* und *reiche* Bevölkerung definiert und über ihre Bevölkerungsdichten u_i beschrieben. Die im Modell erwähnte Interaktion der beiden Morphogene und die damit beschriebene Erzeugung von Aktivatormorphogenen durch Substratmorphogene kann bisher nicht erklärt werden. Um die Terminologie der chemischen oder biologischen Arbeiten zu verwenden, müssten zur Erfüllung einer Aktivator-Substrat-Kinetik die *reichen* Personen in einem *autokatalytischen* Vorgang in Kombination mit *armen* Personen *verbraucht* werden. Während diese Art der Reaktion in der vorgestellten Schnakenberg-Kinetik durch Reaktionsgleichungen und der Reaktionskinetik von Chemikalien beschrieben werden kann, ist eine Analogie zu einer solchen Kinetik in Bezug auf Bevölkerungsdichten in einem sozialen System unbekannt.

Weiterhin führt die bisherige Interpretation von Fernmigration und Kurz-

²⁸MURRAY, *Mathematical Biology II - Spatial Models and Biomedical Applications*, ([145], 2003)

²⁹VIGIL, OUYANG UND SWINNEY, „Turing patterns in a simple gel reactor“, ([227], 1992)

³⁰Vgl. dazu die Arbeiten von Turing [220] und Schnakenberg [189]

streckenmigration zu Inkonsistenzen. Dem Modell nach bewegen sich *reiche* Bevölkerungsgruppen von Gebieten hoher Dichte u_2 in Gebiete niedriger Bevölkerungsdichte (Kurzstreckenmigration D_2). In Gebieten niedriger Bevölkerungsdichte u_2 ist allerdings bei einer sich ausbildenden Turing-Instabilität die Bevölkerungsdichte der *armen* Bevölkerung u_1 hoch. Durch die im Modell vernachlässigte Kreuzdiffusion bewegen sich die Bevölkerungsgruppen innerhalb der Stadt somit unabhängig von der jeweils anderen Bevölkerungsgruppe. Gleichzeitig wird angenommen, dass die *reiche* Bevölkerung von der *armen* Bevölkerung abgestoßen wird (vgl. a_{21} in der Verhaltensmatrix). Obwohl beide Aspekte notwendig für die Herausbildung von Turing-Mustern sind, widersprechen sie sich. Es bleibt unklar, ob, und in welcher Form die *reiche* Bevölkerung in Gebiete mit hoher *armer* Bevölkerungsdichte zieht. Das liegt daran, dass beide Prozesse mit dem Stichwort *Migration* und damit einer Bewegung von Personen bezeichnet werden, die zugrundeliegenden Prozesse aber unterschiedliche Bedeutungen haben. Während die Kurzstreckenmigration der *reichen* Bevölkerung bedeutet, dass sich die Personen in Abhängigkeit von der jeweiligen Bevölkerungsdichte voneinander entfernen, beschreibt die Fernmigration (a_{21}), dass die Entstehungsrate *reicher* Bevölkerung durch den Anstieg der Bevölkerungsdichte von *armer* Bevölkerung abnimmt. Die soziologische Interpretation stößt hier an ihre Grenzen, da nicht klar zwischen beiden Arten der *Migration* unterschieden werden kann.

Neben diesen Schwierigkeiten in der Interpretation der Interaktionsmechanismen ist die Analogie zur Temperatur T , zur Boltzmannkonstante k_B oder der erwähnte Schwellwert der Bevölkerungsdichte ϑ , ab dem physische Gebäudestrukturen ausgebildet werden, bisher unbekannt.

Diese Kritik an nicht präzise formulierten Analogien ist nicht nur an dem vorgestellten Modell angebracht, sondern kann auch auf andere Modelle übertragen werden. So ist auch bei den bereits erwähnten Modellen von Levashova³¹ oder Medda³² die Beschreibung der Morphogene nicht eindeutig.

Berücksichtigung von Gebäudestrukturen

Das Modell geht implizit von der Annahme aus, dass der Prozess der Musterbildung auf einem homogenen Gebiet stattfindet, auf dem sich die beiden Bevölkerungsgruppen frei bewegen können. Dies ist eine Vereinfachung der realen Bedingungen, da sowohl *reiche* als auch *arme* Personengruppen Be-

³¹LEVASHOVA U. A., „A Spatio-Temporal Autowave Model of Shanghai Territory Development“, ([121], 2019)

³²MEDDA, NIJKAMP UND RIETVELD, „A morphogenetic perspective on spatial complexity“, ([138], 2009)

hausungen zum Schutz vor Witterung bauen³³. Dabei stellen auch einfache temporäre Siedlungsstrukturen, wie Zelte, eine physische Barriere für die Bewegung der Bevölkerungsgruppen dar und können die Mobilität der einzelnen Bewohner beeinflussen. Das wiederum führt zu einem anisotropen Migrationsverhalten und damit zu räumlich abhängigen Diffusionskoeffizienten. Im Globalen Süden sind weiterhin die *Gated Communities* ein wiederkehrendes Phänomen³⁴, bei dem sich wohlhabendere Bevölkerungsgruppen vom Rest der Gesellschaft abschirmen, was als starke Barriere für die Diffusion interpretiert werden kann. Dies stellt die im Modell angegebene Annahme der isotropen Diffusion in Frage.

Zusammenfassung

Die ausführliche Diskussion zeigt, dass die Zulässigkeit oder innere Konsistenz des Modells in der bisher dargestellten Weise begrenzt ist. Unter dem Modell wird dabei die Summe aus mathematischer Beschreibung und soziologischer Interpretation verstanden. Während die mathematischen Aussagen das Verhalten einer Turing-Instabilität problemlos beschreiben können, ist die soziologische Interpretation an einigen Stellen unklar und nicht eindeutig. Das ist vor allem auf die unklare Definition der einzelnen Parameter der verwendeten Gleichungen zurückzuführen.

5.1.3 Zweckmäßigkeit

Das in Kapitel 3 entwickelte Modell wurde mit dem Ziel erstellt, eine möglichst einfache und allgemeine Erklärung der Entstehung informeller Siedlungen zu liefern. Die dabei eingenommene technikwissenschaftliche Sichtweise, in deren Mittelpunkt Modelle stehen³⁵, lässt in der Modellbildung bewusst viele Aspekte der Wirklichkeit außer acht, um dieses Ziel zu erreichen. Deshalb wird der Fokus in der Modellierung in Kapitel 3 nicht auf bestimmte lokale Besonderheiten informeller Siedlungen gelegt, sondern deren globale Gemeinsamkeiten betont. Inwieweit die dadurch entstehenden, und im vorherigen Abschnitt besprochenen Differenzen zwischen Modell und Empirie durch Modellerweiterungen behoben werden können, wird im Folgenden besprochen.

³³MAHABIR U. A., „The study of slums as social and physical constructs“, ([130], 2016)

³⁴LOW, „The edge and the center: Gated communities and the discourse of urban fear“, ([126], 2001)

³⁵ACATECH, *Technikwissenschaften: Erkennen - Gestalten - Verantworten*, ([1], 2013, S. 23)

Erweiterungen

In dem vorgestellten Modell wird die Stabilitätsanalyse eines mathematischen Modells mit räumlich und zeitlich homogenen Parametern durchgeführt. Ein solches Modell führt, wie oben gezeigt, zu Mustern mit einer regelmäßigen Anordnung von Konzentrationsspitzen. Diese Regelmäßigkeit kann in empirischen Analysen morphologischer Slums nicht beobachtet werden. In der Literatur wird auch an anderer Stelle betont, dass die in theoretischen oder numerischen Analysen von Reaktions-Diffusions-Modellen, wie dem Schnakenberg-Modell, beobachtete Regelmäßigkeit in realen Daten nicht zu finden ist³⁶. Diese Regelmäßigkeit, die der Symmetrie der Gleichung entstammt, kann durch räumlich und zeitlich variierende Parameter gebrochen werden. Der Einfluss solcher Variationen auf die resultierenden Muster wird intensiv diskutiert^{37,36} und im Folgenden vorgestellt.

Ältere Arbeiten³⁸ zeigen beispielsweise, dass räumliche Sprünge in den Parametern der Reaktionskinetik zu einer Musterbildung führen können, obwohl die in Kapitel 3 ermittelten Bedingungen nicht erfüllt sind. Auf beiden Seiten der Diskontinuität zeigt das System eine geringfügig eingeschränkte Musterbildung, auch wenn die Parameter außerhalb des Turing-Raums liegen. Die Amplituden werden mit zunehmendem Abstand von der Diskontinuität kleiner. Solche lokal begrenzten Muster werden nicht nur durch Parametersprünge hervorgerufen, sondern können auch in Systemen mit unterschiedlichen Randbedingungen auftreten³⁹. Voroney und andere⁴⁰ untersuchen räumlich abhängige Diffusionskoeffizienten und zeigen, dass die dadurch von außen auf das System aufgeprägten Wellenlängen mit denen im System immanent vorhandenen Wellenlängen interagieren.

Die stark topographisch geprägten und in ihrer räumlichen Anordnung variierenden Strukturen in Städten des Globalen Südens könnten daher in einem angepassten Modell durch räumlich und gegebenenfalls zeitlich abhängige Parameter dargestellt werden. Dabei könnte die bisher vernachlässigte Kreuzdiffusion in das Modell einbezogen werden, um die starke Annahme der räumlich unabhängigen Mobilitäten der beiden sozialen Gruppen anpassen zu können. Der Einfluss der Kreuzdiffusion auf den Turing-Mechanismus wurde

³⁶KOZÁK, GAFFNEY UND KLIKA, „Pattern formation in reaction-diffusion systems with piecewise kinetic modulation“, ([107], 2019)

³⁷KRAUSE U. A., „From one pattern into another“, ([112], 2020)

³⁸PAGE, MAINI UND MONK, „Pattern formation in spatially heterogeneous Turing reaction-diffusion models“, ([150], 2003)

³⁹MAINI UND MYERSCOUGH, „Boundary-driven instability“, ([131], 1997)

⁴⁰VORONEY, LAWNICZAK UND KAPRAL, „Turing pattern formation in heterogenous media“, ([228], 1996)

bereits in verschiedenen Arbeiten^{41,42} untersucht.

Bei der Diskussion dieser möglichen Modellerweiterungen muss berücksichtigt werden, dass räumlich variierende Parameter, neben der modellinhärenten charakteristischen Länge, weitere Längenskalen in das System einbringen. Räumliche Variationen von Parametern, die geografische Einflüsse, wie zum Beispiel Berge oder Flüsse, berücksichtigen, sollten daher deutlich größer sein als die systemimmanente Wellenlänge, um die notwendigen Bedingungen der Musterbildung, wie in Kapitel 3 beschrieben, zu erfüllen.

In neueren Studien wird jedoch immer wieder festgestellt, dass die Kriterien für Turing-Muster durch zusätzliche Morphogene im System erweitert werden können⁴³. Beispielsweise könnte, wie oben kurz erwähnt, die Interaktion von zwei auf mehrere soziale Gruppen ausgedehnt werden. Dadurch kann die Kritik an der dichotomen Sichtweise adressiert werden.

Zusammenfassung

Informelle Siedlungen in unterschiedlichen Städten der Erde unterscheiden sich in vielfältiger Weise voneinander. Jeden Aspekt ihres Auftretens zu modellieren ist nicht möglich. Im Rahmen der Modellbildung wird deshalb die Frage nach globalen Ähnlichkeiten in der Entwicklung von informellen Siedlungen in Hinblick auf die Planung von Infrastrukturen gestellt.

Durch die Vernachlässigung von Zusammenhängen und die bisher nicht eindeutig definierten Parameter kann das Modell in der derzeitigen Form nicht für die quantitative Beschreibung der Entwicklung informeller Siedlungen verwendet werden. Es stellt vielmehr eine erste Iteration im Kreislauf der Forschung dar (vgl. Abbildung 1.2). Das Modell kann an unterschiedlichen Stellen entsprechend der oben getätigten Anmerkungen angepasst werden, um die Korrektheit zu erhöhen. Auch müssen für eine konkrete Nutzung und Validierung Eingangsparameter der jeweiligen Städte in das Modell eingepflegt werden, um mögliche Zukunftsszenarien der Entwicklung informeller Siedlungen zu beschreiben.

Neben dieser Beurteilung des Modells wird weiterhin deutlich, dass das Modell und die damit verbundene Frage nach typischen Skalen, diejenige Perspektive auf informelle Siedlungen liefert, die zu den in Kapitel 4 getätigten Analysen geführt hat.

⁴¹VANAG UND EPSTEIN, „Cross-diffusion and pattern formation in reaction–diffusion systems“, ([225], 2009)

⁴²GAMBINO, LOMBARDO UND SAMMARTINO, „Pattern formation driven by cross-diffusion in a 2D domain“, ([60], 2013)

⁴³KUZNETSOV UND POLEZHAEV, „Widening the criteria for emergence of Turing patterns“, ([118], 2020)

Vor allem die in der Modellbildung vorgeschlagene Verknüpfung von menschlichem Verhalten und Bevölkerungsdichten mit der Siedlungsstruktur ist aus einer konzeptionellen Ebene aus von hoher Relevanz für die Planung von Infrastruktur, da die Größe von Infrastrukturen maßgeblich von der Größe der Siedlungen, als auch von der Anzahl der zu versorgenden Personen abhängt. In wieweit menschliches Verhalten mit physikalischen Methoden beschrieben werden kann, wird im folgenden Abschnitt diskutiert.

5.2 Philosophische und modelltheoretische Einordnung

Neben dieser spezifischen Bewertung des Modells nach Hertz⁴⁴ wird es im Folgenden erkenntnistheoretisch eingeordnet⁴⁵.

Der Versuch zwischenmenschliches Verhalten, beziehungsweise soziologische Phänomene mit quantitativen Methoden zu beschreiben, ist nicht neu. Der bekannte Meteorologe und Physiker Lewis Richardson⁴⁶ entwickelt eine quantitative Beschreibung⁴⁷ des kriegerischen Verhaltens zweier benachbarter Nationen. Dabei bildet er die Eigenschaften der beteiligten Nationen durch unterschiedliche Parameter (Rüstungsausgaben, Wirtschaftsleistung, Größe der Armee, etc.) unter Verwendung von Differentialgleichungen ab. Diese Gleichungen sind miteinander gekoppelt und werden von Richardson durch eine Stabilitätsanalyse untersucht, um zu ermitteln, ob Konflikte gedämpft werden, stabil bleiben oder angefacht werden. In diesem Ansatz modelliert Richardson menschliches Verhalten und reduziert es dabei auf wenige Parameter.

Das Modell von Richardson⁴⁷ und die von ihm angenommenen philosophischen Voraussetzungen werden vom russischen Mathematiker und Psychologen Anatol Rapoport⁴⁸ reflektiert und eingeordnet⁴⁹. Diese ursprünglich für das Modell von Richardson entwickelten Überlegungen⁴⁹ werden im Folgenden

⁴⁴HERTZ, *Die Prinzipien der Mechanik: In neuem Zusammenhange dargestellt, Gesammelte Werke*, ([86], 1894)

⁴⁵Die in diesem Abschnitt ausgeführte Diskussion konnte durch Anregungen und Nachfragen von Marko Jesske klarer strukturiert werden.

⁴⁶1881-1953. Richardson führte die erste Wettervorhersage auf Basis mathematischer Berechnungen durch.

⁴⁷RICHARDSON, „Mathematical Psychology of War“, ([178], 1935)

⁴⁸Rapoport war ein breit interessierter Forscher, der intensiv mit Forschenden unterschiedlicher Wissenschaftsdisziplinen, wie Biologie, Physik, Friedens- und Konfliktforschung oder der Ökonomie arbeitete, um die Grenzen zwischen den unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen aufzuheben.

⁴⁹RAPOPORT, „Lewis F. Richardson’s mathematical theory of war“, ([170], 1957)

rekapituliert und auf das in Kapitel 3 vorgestellte Modell übertragen. Zunächst kann festgehalten werden, dass das Turing-Modell, ähnlich, wie das Modell von Richardson⁵⁰, einen Determinismus, der die Basis jeden naturwissenschaftlichen Arbeitens ist, auf ein soziales System überträgt. Die Kernaussage des Determinismus ist, dass mithilfe von Informationen über den aktuellen Zustand eines Systems Aussagen über dessen zukünftigen Zustand getroffen werden können. Dies baut auf der Annahme auf, dass das Verhalten von Systemen durch universell wirkende Kräfte bestimmt wird. Rapoport⁵¹ betont, dass diese deterministische Annahme sowohl in der Naturwissenschaft, als auch in deren Übertragung in die Sozialwissenschaften nur in bestimmten Größenordnungen legitim ist. Während die Bewegung von Himmelskörpern eindeutig beschrieben werden kann, ist das Verhalten von Materie auf atomarer Ebene durch statistisch auftretende Phänomene geprägt. Analog besteht die Annahme, dass sich das Verhalten eines Individuums nicht prognostizieren lässt, das gemittelte Verhalten einer großen Population von Menschen dagegen schon. Ob diese Art des Determinismus auf letztgenannte Systeme außerhalb der Naturwissenschaften übertragen werden kann, muss diskutiert werden. Dieser Determinismus in Bezug auf menschliches Verhalten kann laut Rapoport drei Begründungen haben: (i) *mystisch*, (ii) *halbmystisch* oder (iii) *frei von mystischen Überlegungen*. Rapoport definiert den Begriff *mystisch*⁵² nicht explizit, sondern verwendet ihn implizit als Gegenbegriff zu einer rein auf reproduzierbar gewonnenen empirischen Daten beruhenden, quantitativen Beschreibung von Phänomenen, wie im Folgenden deutlich wird. Ein Beispiel für die Ausprägung des *mystisch* begründeten Determinismus ist laut Rapoport das von Georg Friedrich Wilhelm Hegel besprochene Prinzip des Weltgeistes, welcher sich im Laufe der Geschichte in einer stetigen Abfolge von Synthese durch These und Antithese verwirklicht. Eine solche Vorstellung führt die Ursache oder Motivation menschlichen Verhaltens auf einer höheren Ebene auf einen übernatürlichen Willen zurück⁵³. Dagegen werden nach Rapoport Konzepte, wie jenes von Karl Marx, das zwar auf ökonomischen Berechnungen zur Analyse menschlichen Verhaltens zurückgreift, gleichzeitig aber auch unter Verwendung biologischer Termini von einer *sich entwickelnden Zivilisation* ausgeht, und damit teleologische Kräfte bemüht, als *halbmystisch* bezeichnet. Die dritte Begründung des Determinismus ist laut Rapoport *frei von mysti-*

⁵⁰RICHARDSON, „Mathematical Psychology of War“, ([178], 1935)

⁵¹RAPOPORT, „Lewis F. Richardson’s mathematical theory of war“, ([170], 1957)

⁵²engl. *mystical*

⁵³Eine detaillierte Diskussion dieser von Rapoport vorgenommenen Interpretation Hegels kann im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden.

schen Überlegungen. Dort werden auf Basis empirischer Daten wahrscheinlichkeits-theoretische Aussagen über das Verhalten von Menschen getroffen und auf die oben beschriebenen teleologischen Konzepte verzichtet. Es ist bekannt, dass die Forschung unterschiedlicher Disziplinen in den letzten Jahren dazu übergegangen ist, die Beschreibung vieler Arten von Entwicklungen alleine auf Basis statistischer Zusammenhänge zu beschreiben⁵⁴.

Eine Analyse des in Kapitel 3 entwickelten Modells zeigt in Hinblick auf die oben eingeführten Kategorien, dass obwohl es, ähnlich wie das Konzept von Richardson, soziologische Phänomene mit der Sprache der Mathematik beschreibt, weiterhin auf Motivationen zurückgreift, die bisher nicht statistisch begründet, sondern verbal formuliert werden. In der vorgestellten Form sollte das Modell deshalb der zweiten Kategorie des *halbmystischen* Determinismus zugeordnet werden, da qualitative Aussagen aus Untersuchungen verwendet werden, die nicht auf statistischen Analysen empirischer Daten gründen. Um das Modell in die dritte Kategorie einzuordnen, sollten die aufgestellten Konzepte, wie beispielsweise das der *Verhaltensmatrix*, auf Basis statistisch erhobener Daten quantitativ beschrieben werden und nicht auf der qualitativen Interpretation der zitierten wissenschaftlichen Arbeiten beruhen. Die Einordnung in die letzte Kategorie ist notwendig, um aus dem Modell heraus quantitative Aussagen zu erhalten und das Modell für die Planung von Infrastrukturen verwenden zu können.

Ein erster Schritt in diese Richtung wäre, die Mobilität der unterschiedlichen Gruppen auf eine empirische Datenbasis zu stellen. Beispielhaft seien hierfür aktuelle Studien^{55,56} erwähnt, die die Mobilität von Menschen auf Basis von Mobilfunkdaten analysieren. Die Arbeiten zeigen einerseits, dass sich die Mobilität⁵⁷ von Menschen stark unterscheidet, diese sich aber nicht in zwei diskrete Klassen einordnen lässt, sondern anhand kontinuierlicher Potenzgesetze verläuft.

Andererseits beschreibt dieselbe Forschergruppe⁵⁸, dass die Vorhersagbarkeit

⁵⁴Rapoport betont in diesem Kontext beispielsweise den Vorzug von Darwins statistisch geprägter Sichtweise auf die Evolution im Vergleich zu Lamarcks teleologischer [135]. Diese Entwicklung ist auch in den Geisteswissenschaften zu beobachten. Während Rapoport in seinem 1957 erschienen Aufsatz noch davon spricht, dass der Determinismus in der Geschichte noch immer von einer halbmystischen, teleologischen Sichtweise dominiert ist, betonen aktuelle populärwissenschaftlicher Arbeiten, wie beispielsweise Yuvel Hararis *Eine kurze Geschichte der Menschheit* aus dem Jahr 2011 das Konzept des Zufalls.

⁵⁵TOOLE U. A., „Coupling human mobility and social ties“, ([217], 2015)

⁵⁶GONZÁLEZ, HIDALGO UND BARABÁSI, „Understanding individual human mobility patterns“, ([69], 2008)

⁵⁷SONG U. A., „Modelling the scaling properties of human mobility“, ([201], 2010)

⁵⁸SONG U. A., „Limits of Predictability in Human Mobility“, ([200], 2010)

menschlicher Mobilität begrenzt ist⁵⁹. Diese Untersuchungen führen damit zurück zu der Kernfrage dieses Abschnitts: Ist es möglich menschliches Verhalten deterministisch zu beschreiben, um dieses Wissen beispielsweise für infrastrukturelle Planungen nutzen zu können? Da das Verhalten eines Individuum nicht unter Laborbedingungen untersucht werden kann, sondern immer von sich stetig ändernden sozialen, kulturellen oder ökonomischen Randbedingungen abhängt, scheint eine rein deterministische Beschreibung nicht möglich. Allerdings können auf Basis von Wahrscheinlichkeitstheoretischen Überlegungen mögliche Szenarien von Handlungsmustern entworfen und diese als Grundlage für die Planung von Infrastrukturen genutzt werden.

Eine abschließende Klärung der aufgeworfenen Fragen ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Vielmehr stellen die vorangegangenen Überlegungen einen Rahmen dar, in dem die dem Modell zugrunde liegenden Annahmen reflektiert und eingeordnet werden können, um in einer möglichen Modellweiter- oder Neuentwicklung genutzt werden zu können. Auch für die Analyse⁶⁰ bereits bestehender Ansätze zur Modellierung informeller Siedlungen sind diese Überlegungen sinnvoll.

Auch wenn die Annahmen der Modells konkretisiert und angepasst werden müssen, hat dieses mathematische Modell die Suche nach Zusammenhängen innerhalb eines Systems zum Ziel und dient damit als Startpunkt weiterer Forschung. Rapoport⁶¹ drückt dieses Vorgehen aus, indem er sagt, dass

»ein mathematisches Modell charakteristischerweise eher ein Ausgangspunkt als ein Ankunftspunkt bei der Konstruktion einer Theorie ist. Mathematische Modelle werden oft absichtlich einfach gemacht, mit dem vollen Wissen, dass sie die Realität nicht abbilden. Ihr Hauptwert besteht darin, dass sie zu zwingenden Konsequenzen führen. Diese Konsequenzen werden dann mit Beobachtungen verglichen. Wie so oft stimmen die abgeleiteten Konsequenzen nicht mit den Beobachtungen überein. Aber dann können die Richtung und das Ausmaß der Abweichungen die Richtung der weiteren Forschung angeben.«

In diesem Sinne werden im Folgenden mögliche Modellerweiterungen, eine alternative Nutzung des Modells, als auch mögliche Anwendungen der empirischen Ergebnisse sowie des methodischen Vorgehens vorgestellt.

⁵⁹Die Autoren ermitteln einer Vorhersagbarkeit von 93%.

⁶⁰ROY U. A., „The emergence of slums: A contemporary view on simulation models“, ([185], 2014)

⁶¹RAPOPORT, „Lewis F. Richardson’s mathematical theory of war“, ([170], 1957)

5.3 Modellerweiterungen und Anwendungen

Obwohl das vorgestellte Modell die beobachteten Eigenschaften der räumlichen Verteilung informeller Siedlungen bisher nicht ausreichend abbildet, kann die eingenommene Perspektive auf Fragen der Verstädterung als Startpunkt für weitere Forschungen dienen.

Alternative Konzepte zur Beschreibung der Morphogenese

So ist das Modell nach Turing zwar der erste, aber nicht der einzige Ansatz zur Erklärung der Entstehung von Ordnung oder Mustern in biologischen Systemen. Die bekannteste Alternative ist das von Wolpert⁶² vorgestellte Konzept eines morphogenetischen Feldes. Wolpert geht davon aus, dass sich kleine Heterogenitäten in einem Konzentrationsfeld innerhalb der frühen befruchteten Eizelle verstärken und im Folgenden ebenfalls Strukturen ausbilden⁶³. Er nimmt an, dass keine Symmetrie gebrochen, sondern kleine vorhandenen Asymmetrien verstärkt werden. In der Literatur wird außerdem die Möglichkeit der Kombinationen beider Konzepte diskutiert⁶³. Diese Modelle können somit im Rahmen einer neuen Abduktion als Hypothese neuer Forschungsarbeiten zur Beschreibung der Herausbildung informeller Siedlungsstrukturen dienen.

Identifikation von Mechanismen der Siedlungsentstehung durch Analyse zeitaufgelöster Daten

Weiterhin kann die Annahme, dass bei der Bildung von morphologischen Slums ein Prozess zugrunde liegt, der durch partielle Differentialgleichungen beschreibbar ist, auch in einer alternativen Weise untersucht werden. Auf Basis zeitlich hoch aufgelöster Siedlungsdaten kann ein möglicher zugrundeliegender Mechanismus mithilfe neuer Methoden identifiziert werden. Die Entstehung muss dabei nicht zwangsläufig durch Reaktions-Diffusions Gleichungen beschreibbar sein.

In der Entwicklung von Methoden zur Beantwortung dieser und ähnlicher Fragen wurden in den letzten Jahren enorme Fortschritte erzielt. Rudy und andere⁶⁴ stellen eine Methode vor, die durch die Analyse von Bildern und Bildsequenzen eines Prozesses, die diesen Prozess beschreibenden dimensionslosen Gleichungen und deren Parameter ermittelt. Dabei werden diejenigen

⁶²WOLPERT, „Positional information and the spatial pattern of cellular differentiation“, ([233], 1969)

⁶³GREEN UND SHARPE, „Positional information and reaction-diffusion“, ([71], 2015)

⁶⁴RUDY U. A., „Data-driven discovery of partial differential equations“, ([186], 2017)

räumlichen, als auch zeitlichen Ableitungen identifiziert, die am stärksten mit der räumlichen und zeitlichen Änderung der Bildfolge korrelieren. Verschiedene Gruppen^{65,66} haben weiterhin die Möglichkeit gezeigt, die Parameter eines Turing-Mechanismus auf Basis von Abbildungen der zeitlichen Änderungen der Konzentrationsverläufe mit Hilfe Bayes'scher Statistik zu bestimmen. Eine Anwendung dieser und ähnlicher Methoden⁶⁷ auf zeitaufgelöste Siedlungsdaten könnte eine Identifikation der zugrundeliegenden Mechanismen und der zugehörigen Parameter ermöglichen.

Diese Ansätze müssen in einem weiteren Schritt mit empirischen Daten begründet werden, wofür Ansätze des maschinellen Lernens geeignet sind. In diesen können auf Basis der Analyse global vorhandener Datensätze, wie den World Development Indicators der Weltbank, grundlegende Gemeinsamkeiten der Bildung von informellen Siedlungen identifiziert werden. Dadurch ist eine quantitative Beschreibung von Kernmechanismen, die zum Wachstum dieser Siedlungen beitragen, möglich. In ähnlicher Weise identifizieren Friesen und andere⁶⁸ unter Verwendung dieser Datenbank, dass vor allem in Ländern im Subsahara-Afrika mit einem überdurchschnittlichen Wachstum informeller Siedlungen zu rechnen ist.

Inter-urbane Systeme

In der bisherigen Diskussion wird gezeigt, dass das entwickelte Modell zwar eine typische Skala vorhersagen kann, diese sich aber vor allem auf den Abstand zwischen Siedlungen, und nicht auf die Siedlungsgröße bezieht. Daraus resultiert die Frage, ob andere Arten von Siedlungsstrukturen existieren, die neben einer ähnlichen Größe der Siedlungen auch regelmäßig zueinander angeordnet sind. Eine solche Anordnung urbaner Strukturen könnte das Resultat einer diffusionsgetriebenen Instabilität oder allgemeiner, eines offenen Systems sein. In der Betrachtung urbaner Siedlungsgebiete fällt dabei sofort das Nildelta auf, in dem die Anordnung der Siedlungen eine sehr regelmäßige Struktur aufweist.

In einer weiterführenden Arbeit⁶⁹ werden deshalb Daten des Global Urban

⁶⁵CAMPILLO-FUNOLLET, VENKATARAMAN UND MADZVAMUSE, „Bayesian Parameter Identification for Turing Systems on Stationary and Evolving Domains“, ([25], 2019)

⁶⁶KAZARNIKOV UND HAARIO, „Statistical approach for parameter identification by Turing patterns“, ([98], 2020)

⁶⁷ZHAO U. A., „Learning the Physics of Pattern Formation from Images“, ([239], 2020)

⁶⁸FRIESEN U. A., „Determining Factors for Slum Growth with Predictive Data Mining Methods“, ([54], 2018)

⁶⁹HENN U. A., „Spatial Analysis of Settlement Structures to Identify Pattern Formation Mechanisms in Inter-Urban Systems“, ([85], 2020)

Footprint⁷⁰ verwendet, um die Regelmäßigkeit von Siedlungen in sieben Regionen (Argentinien, China, Ägypten, Frankreich, Indien, Ghana und USA) zu identifizieren und Siedlungsmuster quantitativ nach Anzahl, Dichte und Regelmäßigkeit zu beschreiben. Die Regionen werden auf unterschiedlichen Größenskalen untersucht.

Die Größenverteilungen der Siedlungen in den untersuchten Regionen ähneln einander und weisen ebenfalls einen geometrischen Mittelwert von etwa 0.01 km² auf. Bestimmte Bereiche der untersuchten Gebiete zeigen außerdem eine regelmäßige Siedlungsanordnung ($R > 1.5$). In der in China untersuchten Region lag der Anteil der analysierten Region mit einer regelmäßigen Siedlungsanordnung ($R > 1.5$) bei mehr als 12%. Außerdem wird gezeigt, dass die Anzahl der Siedlungen in einem Gebiet mit der Regelmäßigkeit korrelieren. Das bedeutet, dass je dichter eine Region besiedelt ist, desto wahrscheinlicher ist, dass dort regelmäßige Siedlungsstrukturen vorhanden sind.

Um die strukturbildenden Mechanismen hinter diesen Regelmäßigkeiten zu identifizieren, können zeitlich aufgelöste Siedlungsdaten mithilfe der oben beschriebenen Methodik⁷¹ untersucht werden⁷².

Infrastrukturen

Die im Rahmen dieser Arbeit identifizierten Ergebnisse und Methoden (Kapitel 4) können weiterhin für die Planung von Infrastrukturen unterschiedlicher Art angewendet werden, wie die folgenden beiden Abschnitte zeigen. Der Fokus der Betrachtungen liegt dabei auf der Siedlungsgröße und Vorüberlegungen zur Innovation technischer Systeme.⁷³

⁷⁰Der Global Urban Footprint wurde vom *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt* erstellt, um die Siedlungen auf diesem Planeten mit einer einheitlichen Methode auf Basis von Fernerkundungsdaten darzustellen. Dabei werden Daten der beiden Erdbeobachtungssatelliten *TerraSAR-X* und *TanDEM-X* verwendet. [43, 45, 44]

⁷¹RUDY U. A., „Data-driven discovery of partial differential equations“, ([186], 2017)

⁷²Erste Analysen dieser Art werden von Prokop durchgeführt [165].

⁷³Die konkrete Planung, Realisierung und der Betrieb von Infrastrukturen findet immer in Spannungsfeld unterschiedlicher Stakeholder mit deren jeweiligen eigenen Interessen statt [172, 120] und ist Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeit.

Wasser und Abwasser

Erste Schritte in diese Richtung gehen Friesen, Rausch und andere^{74,75,76,77,78} am Beispiel der Wasserversorgung, indem sie ein Konzept entwickeln, mit dem die Planung von Infrastrukturen für informelle Siedlungen durch die Zusammenarbeit unterschiedlicher Disziplinen verbessert werden soll. Dabei werden die in Kapitel 4 untersuchten Fernerkundungsdaten, in Kombination mit Methoden der diskreten mathematischen Optimierung und technikkwissenschaftlicher Expertise verwendet, um unterschiedliche Topologien von Infrastrukturen in einer intra-urbanen Betrachtung zu bewerten.

Auch die in Kapitel 4 identifizierte globale Ähnlichkeit von morphologischen Slums kann für die Planung von Infrastrukturen verwendet werden. Ein großer Teil von Bewohnern morphologischer Slums weltweit scheint nicht in den bekannten und großen Slums, wie Dharavi in Mumbai, Kibera in Nairobi oder Paraisopolis in Sao Paulo zu leben, sondern in kleineren Siedlungsarealen in der Größenordnung von 10^{-3} km² bis 10^{-1} km². Diese Erkenntnis ist analog zu der bereits erwähnten Aussage, dass die Urbanisierung weltweit nicht in den großen Megastädten mit jeweils mehr als 10 Millionen Einwohnern stattfindet, sondern vor allem in mittelgroßen Städten⁷⁹. In der Planung von Infrastruktur für diese Siedlungsart ist diese Information von großem Wert, da den oben ausgeführten Schätzungen folgend, etwa 40% der Bewohner in Siedlungen einer Größe zwischen 10^{-3} km² bis 10^{-1} km² leben. Die Entwicklung von Versorgungskonzepten für diese Größenskala sind deshalb von großem Nutzen. Weiterhin kann die in dieser Arbeit identifizierte Skala als Eingangsgröße in der Planung der bereits in der Einleitung erwähnten semi-zentralen Wasserversorgungskonzepten⁸⁰ verwendet werden.

Die Größe von 10^{-2} km² sollte in zukünftigen Planungen von städtischen Versorgungsinfrastrukturen berücksichtigt werden, da sie auch in anderen Arbeiten, wie der Größenanalyse von Straßenblocks in nordamerikanischen

⁷⁴FRIESEN, RAUSCH UND PELZ, „Providing water for the poor - towards optimal water supply infrastructures for informal settlements by using remote sensing data“, ([55], 2017)

⁷⁵RAUSCH U. A., „A Holistic Concept to Design Optimal Water Supply Infrastructures for Informal Settlements Using Remote Sensing Data“, ([173], 2018)

⁷⁶RAUSCH U. A., „Using Mixed-Integer Programming for the Optimal Design of Water Supply Networks for Slums“, ([174], 2018)

⁷⁷RAUSCH, *Mathematische Optimierung von Wasserversorgungsnetzwerken für informelle Siedlungen in Mega Cities*, ([172], 2019)

⁷⁸MECK U. A., „Designing a water supply network for slums in Rio de Janeiro using Mixed Integer Programming“, ([137], 2019)

⁷⁹ZHU U. A., „Understanding an urbanizing planet“, ([240], 2019)

⁸⁰BIEKER, CORNEL UND WAGNER, „Semicentralised supply and treatment systems“, ([17], 2010)

und australischen Städten⁸¹ oder in der oben beschriebenen Analyse ländlicher Siedlungen⁸² identifiziert worden ist. Sie scheint eine typische Größe menschlicher Siedlungsstrukturen zu sein.

Medizinische Versorgung und epidemiologische Analysen

Eine weitere Anwendung der Ergebnisse liegt in der notwendige Mindestauflösung epidemiologischer Daten⁸³. Es ist von großem Interesse, das Auftreten von Krankheiten mit einer möglichst hohen räumlichen Auflösung darzustellen, um Ursachen für lokal hohe Inzidenzen zu identifizieren und daraufhin, wie im Fall der Corona-Pandemie im Jahr 2020, lokale Gegenmaßnahmen in die Wege zu leiten oder medizinische Versorgungsinfrastrukturen bereitzustellen⁸⁴. Die umfassendsten epidemiologischen Analysen von Krankheiten und Risikofaktoren auf einer globalen Skala werden vom Institute of Health Metrics and Evaluation mit Sitz in Seattle, Washington durchgeführt und in den zusammenfassenden *Global Burden of Disease*-Studien⁸⁵ veröffentlicht. Das Institut strebt an, die Inzidenzen und Risikofaktoren von Krankheiten weltweit mit einer Auflösung von etwa 5 km x 5 km darzustellen⁸⁶.

Soll nun allerdings, wie beispielsweise von Lilford und anderen⁸⁷ gefordert, die Art der Bebauung informeller Siedlungen als wesentlicher Risikofaktor in epidemiologischen Untersuchungen berücksichtigt werden, so ist es von Interesse diese Auflösung in Städten zu erhöhen. Die in dieser Arbeit identifizierte Größenordnung von 10^{-2} km² beziehungsweise 100 m x 100 m ist dabei zu berücksichtigen. Die hier besprochene Verbindung von Gesundheitsmetriken mit geographischen Daten wird auch von anderen Autoren⁸⁸ als Forschungsrichtung mit hohem Potential betrachtet.

⁸¹SIKUNA, „The effects of block size and form in North American and Australian city centres“, ([194], 1997)

⁸²HENN U. A., „Spatial Analysis of Settlement Structures to Identify Pattern Formation Mechanisms in Inter-Urban Systems“, ([85], 2020)

⁸³FRIESEN U. A., „Slums, Space, and State of Health—A Link between Settlement Morphology and Health Data“, ([48], 2020)

⁸⁴FRIESEN UND PELZ, „COVID-19 and Slums“, ([53], 2020)

⁸⁵MURRAY U. A., „Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019“, ([144], 2020)

⁸⁶Aus der Stellungnahme des Direktors Christopher J. L. Murray. <http://www.healthdata.org/about/director-statement> abgerufen am 17. Januar 2021.

⁸⁷LILFORD U. A., „Because space matters“, ([123], 2019)

⁸⁸TONNE U. A., „Defining pathways to healthy sustainable urban development“, ([216], 2021)

5.4 Modelle als Gegenüber

In einem letzten Abschnitt der Diskussion wird das Vorgehen dieser Arbeit reflektiert. Das im Zentrum der vorangegangenen Ausführungen stehende Modell kann, wie oben bereits gezeigt, in der vorgestellten Form nicht zur Planung von Infrastruktur genutzt werden und erfüllt damit die ursprünglich vorgegebene Zielvorgabe nicht. Mögliche Erweiterungen könnten dem entgegenwirken, erhöhen allerdings die Komplexität und genügen damit nicht mehr der Anforderung an Einfachheit.

Auf Basis dieser Erkenntnisse stellt sich deshalb die Frage, ob ein Modell neben der Abbildung der Wirklichkeit auch einem anderen Zweck dienen kann.

Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erfahrungen sollen einen weiteren Nutzen von Modellen aufzeigen. Neben der Abbildung der Wirklichkeit kann ein Modell auch als Gegenüber oder Gesprächspartner des Forschenden verstanden werden. Im Rahmen der Arbeit wurde der Versuch unternommen, die Entstehung informeller Siedlungsstrukturen, mit einem einfachen Modell aus der mathematischen Biologie zu erklären. Der Forschende tritt dabei mit Ideen und Fragen in einen Dialog mit dem Modell. Er nutzt dabei bekannte Forschungsergebnisse, die zum Teil aus anderen Wissenschaftsdisziplinen stammen, als Gesprächspartner und tritt mit ihnen in einen Dialog, um neue Erkenntnisse zu gewinnen.

Die aus der Literatur bekannten Erkenntnisse zu informellen Siedlungen, wie die starken morphologischen Unterschiede zu ihrer Umgebung⁸⁹ und ihre Herausbildung durch Selbstorganisation⁹⁰ werden mit Konzepten aus anderen Wissenschaftsdomänen, wie der Entwicklungsbiologie in einen Zusammenhang gebracht. Durch die Übertragung des Konzeptes und die Suche nach Analogien entstehen neue Ideen und dadurch auch neue Forschungsfragen. Das Modell bietet damit eine Brille, um eine Fragestellung oder ein System zu untersuchen. Folgende historische Bemerkung verdeutlicht den Wert einer solchen Forschungsweise.

Der Soziologe Niklas Luhmann⁹¹ untersucht die Funktion sozialer Strukturen und beschreibt diese unter Verwendung des Konzeptes der Autopoiesis⁹². Dieses in der Biologie von Varela und Maturana entwickelte Konzept⁹³ beschreibt

⁸⁹TAUBENBÖCK, KRAFF UND WURM, „The morphology of the Arrival City - A global categorization based on literature surveys and remotely sensed data“, ([208], 2018)

⁹⁰BARROS UND SOBREIRA, „City of Slums: self-organisation across scales“, ([8], 2008)

⁹¹LUHMANN, *Soziale Systeme*, ([127], 2018)

⁹²Der griechische Begriff *Autopoiesis* kann mit Selbsterschaffung übersetzt werden.

⁹³VARELA, MATURANA UND URIBE, „Autopoiesis“, ([226], 1974)

die emergente Selbstorganisation von Organismen. Luhmann sieht Analogien zwischen beiden Systemen und überträgt das Konzept der Autopoiesis auf soziale Strukturen. Die in diesem Gespräch mit einem Modell einer anderen Wissenschaftsdisziplin entstandene Theorie ist eines der erfolgreichsten Konzepte der Soziologie des 20. Jahrhunderts⁹⁴. Es ist ein weiteres Beispiel dafür, wie Modelle aus den Naturwissenschaften genutzt werden können, um soziologische Fragestellungen zu untersuchen⁹⁵.

Die in diesem historischen Rückgriff erwähnte Systemtheorie Luhmanns kann nun ebenfalls mit dem in dieser Arbeit entwickelten Konzept einer Turing-Instabilität ins Gespräch gebracht werden. Luhmann⁹⁶ spricht unter Verweis auf das Konzept der Autopoiesis⁹⁷ von der operationalen Geschlossenheit sozialer Systeme. Das heißt, dass soziale Systeme nicht von außen beeinflusst werden können, sondern entsprechend ihrer Eigenschaften auf äußere Reize reagieren und dementsprechend (soziale) Strukturen ausbilden. Luhmann spricht in diesem Zusammenhang von *Order out of noise*. Dieses Prinzip weist Analogien zu dem in Kapitel 3 vorgestellten Modell auf. Die Größe der sich ausbildenden Wellenlänge λ hängt ebenfalls nicht von äußeren Einflüssen ab. Sie ist vielmehr eine Funktion des sozialen Verhaltens der unterschiedlichen Gruppen *arm* und *reich*, die miteinander interagieren und damit in den Systemoperationen der sozialen Gruppen inhärent vorhanden. Während die Theorie Luhmanns aber vor allem qualitative Beschreibungen sozialer Phänomene liefert, wird im vorgestellten Modell der Versuch unternommen, sich dem Prozess durch eine quantitative Beschreibung zu nähern, um die für technikkwissenschaftliche Planungsfragen notwendigen Skalen sozialer Systeme zu erhalten.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Vorgehen stellt somit ein Beispiel für die Integration unterschiedlicher Sichtweisen auf gesamtgesellschaftliche Fragestellungen dar, indem die Disziplinen voneinander lernen und miteinander ins Gespräch treten.

Zum Ende der Diskussion wird, unter Rückgriff auf die in der Einleitung vorgestellte inferentielle Triade (Abbildung 1.2), das Vorgehen dieser Arbeit in Abbildung 5.5 reflektiert: Am Anfang stand die überraschende Tatsache (i), dass Städte sich ähnlich zu Organismen verhalten und formelle und informelle Siedlungen innerhalb der Städte polare Strukturen ausbilden. Dies führte in

⁹⁴RODRÍGUEZ UND TORRES, „Autopoiesis, die Einheit einer Differenz: Luhmann und Maturana“, ([180], 2007)

⁹⁵Für detaillierte Informationen zum Konzept der Autopoiesis, dessen Entwicklungsgeschichte, sowie der Rezeption durch Luhmann sei auf weiterführende Literatur [180] verwiesen.

⁹⁶LUHMANN, *Soziale Systeme*, ([127], 2018)

⁹⁷VARELA, MATURANA UND URIBE, „Autopoiesis“, ([226], 1974)

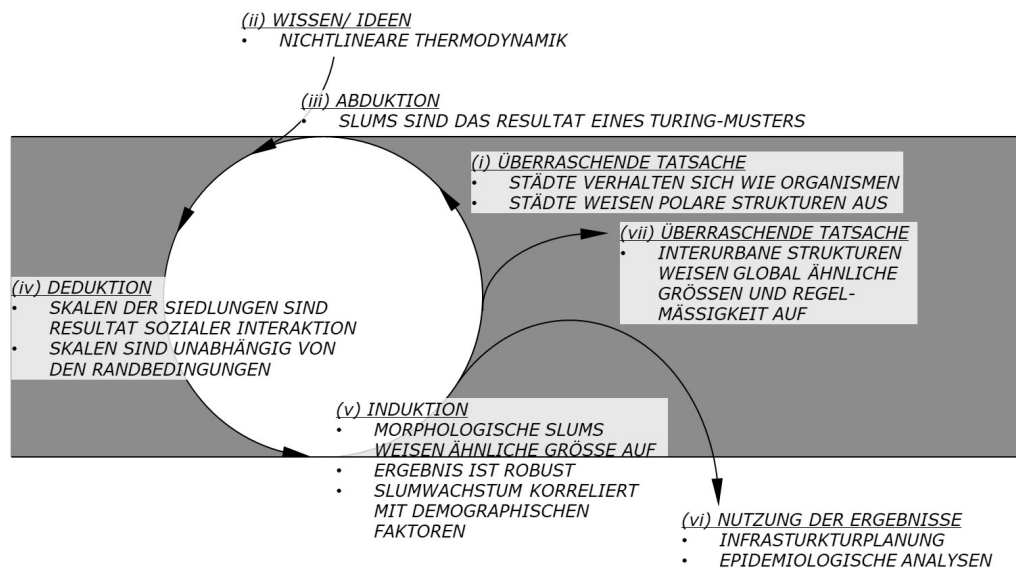


Abbildung 5.5 – Ablauf der vorliegenden Arbeit aus Abduktion, Deduktion und Induktion, sowie mögliche Nutzungen der Ergebnisse.

Kombination mit (iii) Kenntnissen der nichtlinearen Thermodynamik in der (iv) *Abduktion* zu der Hypothese, dass informelle Siedlungen das Resultat eines Turing Musters seien. Diese Hypothese wurde in der *Deduktion* ausgearbeitet⁹⁸. Darauf aufbauend wurden in der (v) *Induktion* sowohl geographische^{99,100}, als auch in Kooperation mit der Informatik demographische¹⁰¹ Daten analysiert. Die (vi) Ergebnisse konnten für die mathematischen Optimierung von Infrastrukturen¹⁰², sowie zur Analyse epidemiologischer Daten¹⁰³ genutzt werden. Weiterhin zeigte eine analoge Analyse inter-urbaner Systeme eine regelmäßige Anordnung, sowie eine global ähnliche Siedlungsgröße¹⁰⁴. Letzteres Ergebnis kann dabei ebenfalls als (vii) überraschende Tatsache für neue

⁹⁸PELZ, FRIESEN UND HARTIG, „Similar size of slums caused by a Turing instability of migration behavior“, ([157], 2019)

⁹⁹FRIESEN U. A., „The similar size of slums“, ([57], 2018)

¹⁰⁰FRIESEN U. A., „Size distributions of slums across the globe using different data and classification methods“, ([56], 2019)

¹⁰¹FRIESEN U. A., „Determining Factors for Slum Growth with Predictive Data Mining Methods“, ([54], 2018)

¹⁰²RAUSCH U. A., „A Holistic Concept to Design Optimal Water Supply Infrastructures for Informal Settlements Using Remote Sensing Data“, ([173], 2018)

¹⁰³FRIESEN U. A., „Slums, Space, and State of Health—A Link between Settlement Morphology and Health Data“, ([48], 2020)

¹⁰⁴HENN U. A., „Spatial Analysis of Settlement Structures to Identify Pattern Formation Mechanisms in Inter-Urban Systems“, ([85], 2020)

Forschungsfragen dienen.

Um Modelle als Brille, Gegenüber und Gesprächspartner zu betrachten, ist die Offenheit gegenüber neuen Ideen und Fragestellungen für neue Erkenntnisse notwendig¹⁰⁵. Abschließend sei deshalb ein Zitat von Richard Sennett¹⁰⁶ erwähnt. Dieser charakterisiert eine offene, innovative Art des Forschens folgendermaßen:

»Forschende versuchen außerhalb der vorgegebenen Bahnen zu denken. Sie grübeln über Widersprüche und Mehrdeutigkeiten nach und verharren eine Weile bei diesen Problemen, statt gleich versuchen sie zu lösen oder beiseitezufegen.«

¹⁰⁵Prigogine bezeichnet beispielsweise die Naturwissenschaft als einen *offenen Dialog mit der Natur* [163]

¹⁰⁶SENNETT, *Die offene Stadt*, ([192], 2019)

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Weltweit lebt im Jahr 2020 etwa ein Achtel der Bevölkerung in urbaner Armut. Die Siedlungsstrukturen dieser Menschen sind häufig unabhängig von lokalen Regularien entstanden und weisen spezielle morphologische Charakteristika auf. Diese als *informelle Siedlungen* bezeichneten Areale sind durch eine scheinbar ungeordnete Anordnung der Gebäude und einen häufig mangelhaften Zugang zu Infrastrukturen gekennzeichnet. Um dies zu ändern, sind technische Lösungen notwendig. Die Frage nach den Randbedingungen und der Skalierung dieser technischen Lösungen ist die Hauptmotivation dieser Arbeit. Obwohl in den ersten beiden Jahrzehnten des 21. Jahrhunderts eine Vielzahl von wissenschaftlichen Arbeiten zur Untersuchung informeller Siedlungen durchgeführt wurde, sind speziell technikwissenschaftliche Perspektiven bisher nicht vorhanden.

Eine solche Perspektive wird in der vorliegenden Arbeit eingenommen und unter Rückgriff auf den erkenntnistheoretischen Ansatz von C. S. Peirce ausgearbeitet. Dabei wird einerseits ein neuartiges, einfaches Modell zur Beschreibung der Entstehung informeller Siedlungen entwickelt und untersucht, ein Vergleich des Modells mit realen Siedlungsverteilungen durchführt, sowie das Vorgehen reflektiert.

Nach einer Evaluation von Ergebnissen unterschiedlicher Forschungsdisziplinen, werden als Grundannahmen des Modells zwei Erkenntnisse miteinander kombiniert: (i) die polare Struktur in Städten des globalen Südens, in denen sich formelle und informelle Siedlungen abwechseln und (ii) die Analogie von Städten und biologischen Organismen. Auf deren Basis wird das bekannte kontinuumsmechanische Modell der diffusionsgetriebenen Instabilität nach Turing zur Beschreibung der Morphogenese von Organismen aufgegriffen und

auf die Entstehung informeller Siedlungen übertragen.

Das Modell beschreibt die Entstehung informeller Siedlungen dabei als Resultat einer Wechselwirkung zweier sozialer Gruppen, *arm* und *reich*. Das Verhalten der beiden Gruppen wird durch zwei Arten der Migration beschrieben: (i) der *Fernmigration*, die den Zuzug der Bevölkerung vom Land in die Stadt beschreibt und Geburten- und Sterberaten enthält, sowie (ii) der *Kurzstreckenmigration*, die durch die Mobilität der jeweiligen Gruppen innerhalb der Stadt beschrieben wird.

Unterscheidet sich die Mobilität ausreichend voneinander, führt die Interaktion beider Migrationsarten zur Herausbildung einer Instabilität und zur Bildung von Mustern, in denen Gebiete hoher Bevölkerungsdichte *armer* Bevölkerung sich mit Gebieten hoher Bevölkerungsdichte *reicher* Bevölkerung abwechseln. Das Modell prognostiziert unter diesen Annahmen die Entstehung informeller Siedlungen in einem regelmäßigen Muster, in dem sowohl der Abstand der Siedlungen, als auch die Siedlungsgröße konstant ist. Die typischen Skalen informeller Siedlungen sind dem Modell nach im zwischenmenschlichen Verhalten immanent vorhanden und werden diesem nicht durch die Randbedingungen in den jeweiligen Städten aufgeprägt.

Diesen theoretischen Überlegungen werden empirische Daten von Siedlungsverteilungen in acht Städten des globalen Südens gegenübergestellt, in denen unter Verwendung von Satellitendaten informelle Siedlungsareale identifiziert werden. Deren Größenverteilungen, sowie die räumlichen Anordnungen der informellen Siedlungen werden untersucht. Es fällt auf, dass sich die Größen der über 7000 identifizierten Siedlungen ähneln und mehr als 85% eine Größe zwischen 10^{-3} und 10^{-1} km² aufweisen. Daneben wird der Einfluss der Klassifikation auf das Ergebnis untersucht und die Robustheit des Ergebnisses durch eine Sensitivitätsanalyse bestätigt. Eine Ähnlichkeit in der räumlichen Anordnung oder eine regelmäßige Anordnung der Siedlungen kann nicht identifiziert werden. Vielmehr ordnen sich die informellen Siedlungen innerhalb einer Stadt in unregelmäßigen Clustern an. Die ermittelte typische Größe informeller Siedlungen kann als Eingangsgröße für die Entwicklung von Konzepten zur infrastrukturellen Versorgung dieser Siedlungen oder als Mindestauflösung epidemiologischer Analysen betrachtet werden.

Zuletzt wird sowohl das Modell an sich, als auch seine Voraussetzungen systematisch analysiert und erkenntnistheoretisch eingeordnet. Obwohl einige der vom Modell getätigten Aussagen nicht durch die empirischen Ergebnisse bestätigt werden können, hat die Modellierung einen Rahmen geschaffen, in dem neue Erkenntnisse gewonnen werden können.

Die Arbeit und die in ihrem Kontext entstandenen Veröffentlichungen^{1,2,3,4,5,6,7} sind ein Beispiel dafür, dass Forschung an komplexen Fragen, wie der Urbanisierung, nicht losgelöst, sondern immer im Gespräch mit anderen Disziplinen stattfinden kann und sollte.

Ausblick

Ausgehend von den vorgestellten Ergebnissen entstehen vielfältige Möglichkeiten zukünftiger Forschung. Die bisher durchgeführten Studien sollten auf eine breitere empirische Basis gestellt werden, wobei vor allem ein Fokus auf die Erforschung informeller Siedlungen in Subsahara-Afrika gelegt werden sollte, das einen großen Teil der weltweiten Bevölkerung in urbaner Armut beherbergt. Im Hinblick auf die Infrastruktur sind weiterhin detaillierte Arbeiten zur Ermittlung der Bevölkerungsdichte in diesen Siedlungen notwendig, da der Versorgungsbedarf von der Anzahl der zu versorgenden Menschen abhängt.

Darüber hinaus sind umfassende Analysen der Größenverteilungen von Gebäuden innerhalb der einzelnen informellen Siedlungen sinnvoll. Dadurch können Skalen innerhalb dieser Areale, sowie die Variabilität von Gebäudegrößen innerhalb einer Stadt ermittelt werden, welche die kleinsten zu versorgenden Einheiten darstellen. Dabei sollte auch die Form der informellen Siedlungen und die in den Siedlungen vorhandenen Wegeinfrastrukturen untersucht werden, um ein vertieftes Verständnis der Topologie zu erhalten.

Weiterhin ist in diesem Kontext die räumliche Anordnung informeller Siedlungen in Städten von Interesse, um die Größen, der in dieser Arbeit beschriebenen geclusterten Anordnungen detaillierter beschreiben zu können. Diese können als Eingangsgröße in die Konzeption von intra-urbanen Infrastruktursystemen eingehen.

¹ FRIESEN U. A., „The similar size of slums“, ([57], 2018)

² FRIESEN U. A., „Size distributions of slums across the globe using different data and classification methods“, ([56], 2019)

³ RAUSCH U. A., „A Holistic Concept to Design Optimal Water Supply Infrastructures for Informal Settlements Using Remote Sensing Data“, ([173], 2018)

⁴ PELZ, FRIESEN UND HARTIG, „Similar size of slums caused by a Turing instability of migration behavior“, ([157], 2019)

⁵ FRIESEN U. A., „Determining Factors for Slum Growth with Predictive Data Mining Methods“, ([54], 2018)

⁶ FRIESEN U. A., „Slums, Space, and State of Health—A Link between Settlement Morphology and Health Data“, ([48], 2020)

⁷ FRIESEN UND PELZ, „COVID-19 and Slums“, ([53], 2020)

Weiterhin sollten in kommenden Arbeiten die zeitliche Entwicklung informeller Siedlungen genauer untersucht werden, um diese Siedlungsart und die daraus resultierenden städtischen Strukturen besser zu verstehen. Ein besonderer Fokus sollte auf die Variabilität der Entwicklung in unterschiedlichen Bereichen der jeweils betrachteten Stadt gelegt und diese auch quantifiziert werden. Stochastische Analysen der zeitlichen Entwicklung informeller Siedlungen, in Kombination mit der Kenntnis der global ähnlichen Größe können zu einer robusten Konzeption und Planung von Infrastruktur für diese Siedlungsareale führen. Die Entwicklung solcher Infrastrukturkonzepte bedarf der Zusammenarbeit unterschiedlicher Disziplinen. Es muss weiterhin untersucht werden, inwieweit die Bereitstellung von Infrastruktur die zeitliche Entwicklung dieser Siedlungen beeinflusst.

Neben der empirischen Analyse informeller Siedlungen ist deren Modellierung ein weiteres Werkzeug für die Planung von Infrastrukturen. Der enorme technologische Fortschritt stellt dafür neben den hier verwendeten Satellitendaten viele weitere Datenquellen, wie beispielsweise die der sozialen Medien, zur Verfügung. Diese bieten die Möglichkeit menschliches Verhalten besser zu verstehen und modellieren zu können.

Die große Fülle neu hinzukommender Informationen birgt die Möglichkeit, in der Erforschung der im Kontext der Urbanisierung entstehenden Herausforderungen, im disziplinübergreifenden Gespräch zu bleiben und die Erkenntnisse anderer Fachbereiche zu nutzen. Um sich dabei nicht in Details und Nuancen zu verlieren, bleibt die in dieser Arbeit betonte Maxime bestehen, trotz der enormen Datenmengen, die Entwicklung einfacher Modelle anzustreben. Dafür ist Offenheit notwendig.

Offenheit ist ein Kennzeichen des Lebens an sich, das sich dadurch immer weiter entwickelt. Ebenso sind die hier untersuchten informellen Siedlungen offene Systeme, die mit ihrer Umgebung im Austausch stehen und in kreativer Weise den Herausforderungen der Urbanisierung begegnen. Diese Analogie kann zuletzt auch als Ausblick auf die weitere Forschung übertragen werden. Deren Offenheit für neue Ideen und fremde Sichtweisen anderer Disziplinen kann zu neuen kreativen Lösungen für die in dieser Arbeit beschriebenen globalen Herausforderungen führen. Offenheit und Kreativität sind damit Grundlagen neuer wissenschaftlicher Erkenntnis. In diesem Sinne wird diese Arbeit mit einer Feststellung und Aufforderung von Henri Matisse beendet:

»Kreativität braucht Mut.«

Literatur

- [1] acatech, Hrsg. *Technikwissenschaften: Erkennen - Gestalten - Verant-*
worten. acatech IMPULS. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidel-
berg, 2013.
- [2] I. Ahmed. „Factors in building resilience in urban slums of Dhaka,
Bangladesh“. en. In: *Procedia Economics and Finance* 18 (2014), S. 745–
753.
- [3] S. Alkire und M. E. Santos. „Measuring Acute Poverty in the Develo-
ping World: Robustness and Scope of the Multidimensional Poverty
Index“. en. In: *World Development* 59 (Juli 2014), S. 251–274.
- [4] P. M. Allen und M. Sanglier. „A Dynamic Model of Growth in a Central
Place System“. en. In: *Geographical Analysis* 11.3 (1979), S. 256–272.
- [5] J. R. Anderson. *A land use and land cover classification system for*
use with remote sensor data. Bd. 964. US Government Printing Office,
1976.
- [6] F. Auerbach. „Das Gesetz der Bevölkerungskonzentration“. In: *Peter-*
manns Geographische Mittheilungen 59 (1913), S. 74–76.
- [7] O. S. Badmos, A. Rienow, D. Callo-Concha, K. Greve und C. Jürgens.
„Simulating slum growth in Lagos: An integration of rule based and
empirical based model“. en. In: *Computers, Environment and Urban*
Systems 77 (Sep. 2019), S. 101369.
- [8] J. Barros und F. Sobreira. „City of Slums: self-organisation across
scales“. In: *Unifying Themes in Complex Systems IV*. 2008.
- [9] M. Batty. „A Theory of City Size“. en. In: *Science* 340.6139 (Juni
2013), S. 1418–1419.
- [10] M. Batty. „The Size, Scale, and Shape of Cities“. en. In: *Science*
319.5864 (Feb. 2008), S. 769–771.
- [11] M. Batty. „Building a science of cities“. en. In: *Cities* 29 (März 2012),
S9–S16.

- [12] I. S. Baud, K. Pfeffer, N. Sridharan und N. Nainan. „Matching deprivation mapping to urban governance in three Indian mega-cities“. en. In: *Habitat International* 33.4 (Okt. 2009), S. 365–377.
- [13] H. Bénard. *Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide propageant de la chaleur par convection: en régime permanent*. Gauthier-Villars, 1901.
- [14] B. J. Berry. „Urbanization“. In: *Urban ecology*. Springer, 2008, S. 25–48.
- [15] L. M. A. Bettencourt. „The Origins of Scaling in Cities“. en. In: *Science* 340.6139 (Juni 2013), S. 1438–1441.
- [16] L. M. A. Bettencourt, J. Lobo, D. Helbing, C. Kuhnert und G. B. West. „Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities“. en. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104.17 (Apr. 2007), S. 7301–7306.
- [17] S. Bieker, P. Cornel und M. Wagner. „Semicentralised supply and treatment systems: integrated infrastructure solutions for fast growing urban areas“. en. In: *Water Science and Technology* 61.11 (Juni 2010), S. 2905–2913.
- [18] L. Boltzmann. „Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze des mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung, respective den Sätzen über das Wärmegleichgewicht.“ In: Springer, 1877.
- [19] R. Bouffanais und S. S. Lim. „Cities — try to predict superspreading hotspots for COVID-19“. en. In: *Nature* 583.7816 (Juli 2020), S. 352–355.
- [20] C. Brelsford, T. Martin, J. Hand und L. M. A. Bettencourt. „Toward cities without slums: Topology and the spatial evolution of neighborhoods“. en. In: *Science Advances* 4.8 (Aug. 2018), eaar4644.
- [21] V. C. Broto, A. Allen und E. Rapoport. „Interdisciplinary Perspectives on Urban Metabolism“. en. In: *Journal of Industrial Ecology* 16.6 (Dez. 2012), S. 851–861.
- [22] C. Brunner. „Das Konzept epistemische Gewalt als Element einer transdisziplinären Friedens- und Konflikttheorie“. ger. In: (2016). Publisher: Drava Verlag.
- [23] G. Bryan, E. Glaeser und N. Tsivanidis. „Cities in the Developing World“. en. In: *Annual Review of Economics* 12.1 (Aug. 2020), S. 273–297.

- [24] N. M. Butala, M. J. VanRooyen und R. B. Patel. „Improved health outcomes in urban slums through infrastructure upgrading“. en. In: *Social Science & Medicine* 71.5 (Sep. 2010), S. 935–940.
- [25] E. Campillo-Funollet, C. Venkataraman und A. Madzvamuse. „Bayesian Parameter Identification for Turing Systems on Stationary and Evolving Domains“. en. In: *Bulletin of Mathematical Biology* 81.1 (Jan. 2019), S. 81–104.
- [26] C. Castellano, S. Fortunato und V. Loreto. „Statistical physics of social dynamics“. en. In: *Reviews of Modern Physics* 81.2 (Mai 2009), S. 591–646.
- [27] V. Castets, E. Dulos, J. Boissonade und P. De Kepper. „Experimental evidence of a sustained standing Turing-type nonequilibrium chemical pattern“. en. In: *Physical Review Letters* 64.24 (Juni 1990), S. 2953–2956.
- [28] J. P. Chauvin, E. Glaeser, Y. Ma und K. Tobio. „What is different about urbanization in rich and poor countries? Cities in Brazil, China, India and the United States“. en. In: *Journal of Urban Economics* 98 (März 2017), S. 17–49.
- [29] Q. Chen, J. Shi, Y. Tao und M. Zernicka-Goetz. „Tracing the origin of heterogeneity and symmetry breaking in the early mammalian embryo“. en. In: *Nature Communications* 9.1 (Dez. 2018).
- [30] W. Christaller. *Die zentralen Orte in Süddeutschland: eine ökonomisch-geographische Untersuchung über die Gesetzmässigkeit der Verbreitung und Entwicklung der Siedlungen mit städtischen Funktionen*. University Microfilms, 1933.
- [31] P. J. Clark und F. C. Evans. „Distance to Nearest Neighbor as a Measure of Spatial Relationships in Populations“. en. In: *Ecology* 35.4 (Okt. 1954), S. 445–453.
- [32] R. Clausius. „Ueber verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie“. de. In: *Annalen der Physik und Chemie* 201.7 (1865), S. 353–400.
- [33] S. H. Cochrane. *Fertility and education: What do we really know?* Baltimore und London: The Johns Hopkins University Press, 1979.
- [34] M. C. Cross und P. C. Hohenberg. „Pattern formation outside of equilibrium“. In: *Reviews of modern physics* 65.3 (1993), S. 851.
- [35] M. Davis. *Planet of slums*. eng. Nachdr. London: Verso, 2006.

- [36] I. Degert, P. Parikh und R. Kabir. „Sustainability assessment of a slum upgrading intervention in Bangladesh“. en. In: *Cities* 56 (Juli 2016), S. 63–73.
- [37] A. Deshpande u. a. „Mapping geographical inequalities in access to drinking water and sanitation facilities in low-income and middle-income countries, 2000–17“. en. In: *The Lancet Global Health* 8.9 (Sep. 2020), e1162–e1185.
- [38] K. Dovey, M. van Oostrum, I. Chatterjee und T. Shafique. „Towards a morphogenesis of informal settlements“. en. In: *Habitat International* 104 (Okt. 2020), S. 102240.
- [39] K. Dovey, T. Shafique, M. van Oostrum und I. Chatterjee. „Informal settlement is not a euphemism for ‘slum’: what’s at stake beyond the language?“. en. In: *International Development Planning Review* (Juli 2020), S. 1–12.
- [40] E. Durkheim. *De la division du travail social*. F. Alcan, 1911.
- [41] G. Dyson. *Turing’s cathedral: the origins of the digital universe*. Pantheon, 2012.
- [42] A. Einstein. „Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen“. In: *Annalen der physik* 4 (1905).
- [43] T. Esch, A. Schenk, T. Ullmann, M. Thiel, A. Roth und S. Dech. „Characterization of Land Cover Types in TerraSAR-X Images by Combined Analysis of Speckle Statistics and Intensity Information“. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 49.6 (Juni 2011), S. 1911–1925.
- [44] T. Esch, F. Bachofer, W. Heldens, A. Hirner, M. Marconcini, D. Palacios-Lopez, A. Roth, S. Üreyen, J. Zeidler, S. Dech und N. Gorelick. „Where We Live—A Summary of the Achievements and Planned Evolution of the Global Urban Footprint“. en. In: *Remote Sensing* 10.6 (Juni 2018), S. 895.
- [45] T. Esch, W. Heldens, A. Hirner, M. Keil, M. Marconcini, A. Roth, J. Zeidler, S. Dech und E. Strano. „Breaking new ground in mapping human settlements from space – The Global Urban Footprint“. en. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 134 (Dez. 2017), S. 30–42.

- [46] A. Ezech, O. Oyebode, D. Satterthwaite, Y.-F. Chen, R. Ndugwa, J. Sartori, B. Mberu, G. J. Melendez-Torres, T. Haregu, S. I. Watson, W. Caiaffa, A. Capon und R. J. Lilford. „The history, geography, and sociology of slums and the health problems of people who live in slums“. en. In: *The Lancet* 389.10068 (Feb. 2017), S. 547–558.
- [47] A. Fick. „Ueber diffusion“. In: *Annalen der Physik* 170.1 (1855). Publisher: Wiley Online Library, S. 59–86.
- [48] J. Friesen, V. Friesen, I. Dietrich und P. F. Pelz. „Slums, Space, and State of Health—A Link between Settlement Morphology and Health Data“. en. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17.6 (März 2020), S. 2022.
- [49] J. Friesen, J. Hartig, K. Henn und P. F. Pelz. „Diffusion-driven demographics – Turing model as a concept for the emergence of sedentism“. In: *arXiv:2005.05107 [nlin, physics:physics, q-bio]* (Mai 2020).
- [50] J. Friesen, J. Hartig und P. F. Pelz. „Revisiting the Mechanism Behind the Similar Size of Slums“. In: *Preprints.org* (Dez. 2020).
- [51] J. Friesen, C. Knoche, J. Hartig, P. F. Pelz, H. Taubenböck und M. Wurm. „Sensitivity of slum size distributions as a function of spatial parameters for slum classification“. In: *2019 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*. Vannes, France: IEEE, Mai 2019, S. 1–4.
- [52] J. Friesen, M. Lestakova, J. Kaltenmorgen, S. Nahaganeshan, P. F. Pelz, H. Taubenböck und M. Wurm. „Size Distributions for Morphological Slums in Asia and South America“. In: *2019 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*. Vannes, France: IEEE, Mai 2019, S. 1–4.
- [53] J. Friesen und P. F. Pelz. „COVID-19 and Slums: A Pandemic Highlights Gaps in Knowledge About Urban Poverty“. en. In: *JMIR Public Health and Surveillance* 6.3 (Sep. 2020), e19578.
- [54] J. Friesen, L. Rausch, P. Pelz und J. Fürnkranz. „Determining Factors for Slum Growth with Predictive Data Mining Methods“. In: *Urban Science* 2.3 (2018), S. 81.
- [55] J. Friesen, L. Rausch und P. F. Pelz. „Providing water for the poor - towards optimal water supply infrastructures for informal settlements by using remote sensing data“. In: IEEE, März 2017, S. 1–4.
- [56] J. Friesen, H. Taubenböck, M. Wurm und P. F. Pelz. „Size distributions of slums across the globe using different data and classification methods“. en. In: *European Journal of Remote Sensing* (März 2019), S. 1–13.

- [57] J. Friesen, H. Taubenböck, M. Wurm und P. F. Pelz. „The similar size of slums“. en. In: *Habitat International* 73 (März 2018), S. 79–88.
- [58] J. Friesen, R. Tessmann und P. Pelz. „Reaction-diffusion Model Describing the Morphogenesis of Urban Systems in the US:“ In: *Proceedings of the 5th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*. Heraklion, Crete, Greece: SCITEPRESS - Science und Technology Publications, 2019, S. 88–96.
- [59] R. A. Fuller und K. J. Gaston. „The scaling of green space coverage in European cities“. en. In: *Biology Letters* 5.3 (Juni 2009), S. 352–355.
- [60] G. Gambino, M. Lombardo und M. Sammartino. „Pattern formation driven by cross-diffusion in a 2D domain“. en. In: *Nonlinear Analysis: Real World Applications* 14.3 (Juni 2013), S. 1755–1779.
- [61] K. Gaur, K. Keshri und W. Joe. „Does living in slums or non-slums influence women’s nutritional status? Evidence from Indian mega-cities“. en. In: *Social Science & Medicine* 77 (Jan. 2013), S. 137–146.
- [62] C. M. Gevaert, D. Kohli und M. Kuffer. „Challenges of mapping the missing spaces“. In: *2019 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*. Vannes, France: IEEE, Mai 2019, S. 1–4.
- [63] A. Gierer und H. Meinhardt. „A theory of biological pattern formation“. In: *Kybernetik* 12.1 (1972), S. 30–39.
- [64] A. Gilbert. „The Return of the Slum: Does Language Matter?: The return of the slum: does language matter?“ en. In: *International Journal of Urban and Regional Research* 31.4 (Dez. 2007), S. 697–713.
- [65] E. Glaeser. „Cities, Productivity, and Quality of Life“. en. In: *Science* 333.6042 (Juli 2011), S. 592–594.
- [66] E. L. Glaeser, M. E. Kahn und J. Rappaport. „Why do the poor live in cities? The role of public transportation“. en. In: *Journal of Urban Economics* 63.1 (Jan. 2008), S. 1–24.
- [67] A. Goldbeter. „Dissipative structures and biological rhythms“. en. In: *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 27.10 (Okt. 2017), S. 104612.
- [68] A. Goldbeter. „Dissipative structures in biological systems: bistability, oscillations, spatial patterns and waves“. en. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 376.2124 (Juli 2018), S. 20170376.

- [69] M. C. González, C. A. Hidalgo und A.-L. Barabási. „Understanding individual human mobility patterns“. en. In: *Nature* 453.7196 (Juni 2008), S. 779–782.
- [70] R. González-Val, A. Ramos, F. Sanz-Gracia und M. Vera-Cabello. „Size distributions for all cities: Which one is best?“ In: *Papers in Regional Science* 94.1 (2015), S. 177–196.
- [71] J. B. A. Green und J. Sharpe. „Positional information and reaction-diffusion: two big ideas in developmental biology combine“. en. In: *Development* 142.7 (Apr. 2015), S. 1203–1211.
- [72] N. J. Grove und A. B. Zwi. „Our health and theirs: Forced migration, othering, and public health“. en. In: *Social Science & Medicine* 62.8 (Apr. 2006), S. 1931–1942.
- [73] A. Grübler und D. J. Fisk. *Energizing sustainable cities: assessing urban energy*. Routledge, 2013.
- [74] O. Gruebner, J. Sachs, A. Nockert, M. Frings, M. M. H. Khan, T. Lakes und P. Hostert. „Mapping the Slums of Dhaka from 2006 to 2010“. en. In: *Dataset Papers in Science* 2014 (2014), S. 1–7.
- [75] UN-Habitat. *Habitat III Issue papers - 22 Informal Settlements*. Techn. Ber. New York: United Nations, Mai 2015.
- [76] UN-Habitat, Hrsg. *The millennium development goals and urban sustainability: 30 years of shaping the Habitat Agenda*. eng. Reprint. The state of the world’s cities report 3. London: Earthscan, 2007.
- [77] UN-Habitat. *World Cities Report 2020: the value of sustainable urbanization*. English. S.l.: UNITED NATIONS, 2020.
- [78] S. Hachmann, J. Jokar Arsanjani und E. Vaz. „Spatial data for slum upgrading: Volunteered Geographic Information and the role of citizen science“. en. In: *Habitat International* 72 (Feb. 2018), S. 18–26.
- [79] J. Hartig. *Analyse von Reaktions-Diffusions-Gleichungen zur Modellierung der Veränderung urbaner Strukturen*. Abschlussbericht 298. Darmstadt: TU Darmstadt, 2018.
- [80] J. Hartig, J. Friesen und P. F. Pelz. „Spatial relations of slums: size of slum clusters“. In: *2019 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*. Vannes, France: IEEE, Mai 2019, S. 1–4.
- [81] C. Hartshorne, P. Weiss und A. W. Burks. *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*. Bd. 1. Harvard University Press Cambridge, 1931.
- [82] K. Healy. „Fuck Nuance“. en. In: *Sociological Theory* 35.2 (Juni 2017), S. 118–127.

- [83] H. v. Helmholtz. „„Über das Verhältnis der Naturwissenschaften zur Gesamtheit der Wissenschaften “. Akademische Festrede (1862)“. In: *Hermann von Helmholtz, Vorträge und Reden* 1 (1896), S. 157–186.
- [84] K. Henn. *Analyse von interurbanen Strukturen und deren Modellierung mittels Reaktions-Diffusions-Gleichungen*. Abschlussbericht 380. Darmstadt: TU Darmstadt, 2019.
- [85] K. Henn, J. Friesen, J. Hartig und P. F. Pelz. „Spatial Analysis of Settlement Structures to Identify Pattern Formation Mechanisms in Inter-Urban Systems“. en. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9.9 (Sep. 2020), S. 541.
- [86] H. Hertz. *Die Prinzipien der Mechanik: In neuem Zusammenhange dargestellt, Gesammelte Werke*. J. A. Barth Leipzig, 1894.
- [87] P. Hertz. „Über den gegenseitigen durchschnittlichen Abstand von Punkten, die mit bekannter mittlerer Dichte im Raume angeordnet sind“. de. In: *Mathematische Annalen* 67.3 (Sep. 1909), S. 387–398.
- [88] J. Hoerning. *Megastädte zwischen Begriff und Wirklichkeit - Über Raum, Planung und Alltag in großen Städten*. 1. Aufl. Bielefeld: transcript Verlag, 2016.
- [89] P. Hofmann, H. Taubenböck und C. Werthmann. „Monitoring and modelling of informal settlements - A review on recent developments and challenges“. In: *2015 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*. Lausanne, Switzerland: IEEE, März 2015, S. 1–4.
- [90] M. Holl. *Zur modellbasierten, ganzheitlich-optimalen Entscheidung über technische Systeme*. Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik 14. Shaker, 2017.
- [91] J. Horvath, I. Szalai und P. De Kepper. „An Experimental Design Method Leading to Chemical Turing Patterns“. en. In: *Science* 324.5928 (Mai 2009), S. 772–775.
- [92] M. R. Ibrahim, H. Titheridge, T. Cheng und J. Haworth. „predictS-LUMS: A new model for identifying and predicting informal settlements and slums in cities from street intersections using machine learning“. en. In: *Computers, Environment and Urban Systems* 76 (Juli 2019), S. 31–56.
- [93] J. Illian, Hrsg. *Statistical analysis and modelling of spatial point patterns*. Statistics in practice. Chichester, England ; Hoboken, NJ: John Wiley, 2008.

- [94] M. Islam und N. Sultana. „Risk factors for pregnancy related complications among urban slum and non-slum women in Bangladesh“. en. In: *BMC Pregnancy and Childbirth* 19.1 (Dez. 2019).
- [95] Jati Pratomo, Monika Kuffer, Javier Martinez und Divyani Kohli. „Coupling Uncertainties with Accuracy Assessment in Object-Based Slum Detections, Case Study: Jakarta, Indonesia“. en. In: *Remote Sensing* 9.11 (Nov. 2017), S. 1164.
- [96] L. Kajetzke. *Wissen im Diskurs*. Springer, 2008.
- [97] D. Karig, K. M. Martini, T. Lu, N. A. DeLateur, N. Goldenfeld und R. Weiss. „Stochastic Turing patterns in a synthetic bacterial population“. en. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115.26 (Juni 2018), S. 6572–6577.
- [98] A. Kazarnikov und H. Haario. „Statistical approach for parameter identification by Turing patterns“. en. In: *Journal of Theoretical Biology* 501 (Sep. 2020), S. 110319.
- [99] M. M. H. Khan, A. Khan, A. Kraemer und M. Mori. „Prevalence and correlates of smoking among urban adult men in Bangladesh: slum versus non-slum comparison“. en. In: *BMC Public Health* 9.1 (Dez. 2009).
- [100] O. Kit und M. Lüdeke. „Automated detection of slum area change in Hyderabad, India using multitemporal satellite imagery“. en. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 83 (Sep. 2013), S. 130–137.
- [101] D. Kohli, M. Kuffer und C. M. Gevaert. „The Generic Slum Ontology: Can a Global Slum Repository be created?“ In: *2019 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*. Vannes, France: IEEE, Mai 2019, S. 1–4.
- [102] D. Kohli, R. Sliuzas, N. Kerle und A. Stein. „An ontology of slums for image-based classification“. en. In: *Computers, Environment and Urban Systems* 36.2 (März 2012), S. 154–163.
- [103] D. Kohli, A. Stein und R. Sliuzas. „Uncertainty analysis for image interpretations of urban slums“. en. In: *Computers, Environment and Urban Systems* 60 (Nov. 2016), S. 37–49.
- [104] D. Kondepudi und I. Prigogine. *Modern Thermodynamics*. Chichester, 1998.

- [105] S. Kondo und T. Miura. „Reaction-Diffusion Model as a Framework for Understanding Biological Pattern Formation“. en. In: *Science* 329.5999 (Sep. 2010), S. 1616–1620.
- [106] K. Kornwachs und D. A. der Technikwissenschaften, Hrsg. *Technikwissenschaften: Erkennen - Gestalten - Verantworten*. ger. acatech IMPULS. Berlin: Springer Vieweg, 2013.
- [107] M. Kozák, E. A. Gaffney und V. Klika. „Pattern formation in reaction-diffusion systems with piecewise kinetic modulation: An example study of heterogeneous kinetics“. en. In: *Physical Review E* 100.4 (Okt. 2019).
- [108] F. Kraas und S. Schlacke. *Der Umzug der Menschheit: die transformative Kraft der Städte*. ger. Berlin: Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung, Globale Umweltveränderungen, 2016.
- [109] N. J. Kraff, H. Taubenböck und M. Wurm. „How dynamic are slums? EO-based assessment of Kibera’s morphologic transformation“. In: *2019 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*. Vannes, France: IEEE, Mai 2019, S. 1–4.
- [110] N. J. Kraff, M. Wurm und H. Taubenböck. „The dynamics of poor urban areas - analyzing morphologic transformations across the globe using Earth observation data“. en. In: *Cities* 107 (Dez. 2020), S. 102905.
- [111] N. J. Kraff, M. Wurm und H. Taubenböck. „Uncertainties of Human Perception in Visual Image Interpretation in Complex Urban Environments“. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 13 (2020), S. 4229–4241.
- [112] A. L. Krause, V. Klika, T. E. Woolley und E. A. Gaffney. „From one pattern into another: analysis of Turing patterns in heterogeneous domains via WKBJ“. en. In: *Journal of The Royal Society Interface* 17.162 (Jan. 2020), S. 20190621.
- [113] A. Krishna. „Stuck in Place: Investigating Social Mobility in 14 Bangalore Slums“. en. In: *Journal of Development Studies* 49.7 (Juli 2013), S. 1010–1028.
- [114] P. R. Krugman. *The self-organizing economy*. Bd. 122. Blackwell Oxford, 1996.
- [115] M. Krumer-Nevo und O. Benjamin. „Critical Poverty Knowledge: Contesting Othering and Social Distancing“. en. In: *Current Sociology* 58.5 (Sep. 2010), S. 693–714.
- [116] M. Kuffer, F. Orina, R. Sliuzas und H. Taubenböck. „Spatial patterns of slums: Comparing African and Asian cities“. In: IEEE, 2017, S. 1–4.

- [117] M. Kuffer, K. Pfeffer und R. Sliuzas. „Slums from Space—15 Years of Slum Mapping Using Remote Sensing“. en. In: *Remote Sensing* 8.6 (Mai 2016), S. 455.
- [118] M. Kuznetsov und A. Polezhaev. „Widening the criteria for emergence of Turing patterns“. en. In: *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 30.3 (März 2020), S. 033106.
- [119] D. v. Laak. *Alles im Fluss: die Lebensadern unserer Gesellschaft: Geschichte und Zukunft der Infrastruktur*. ger. Frankfurt am Main: S. Fischer, 2018.
- [120] G. Leonita, M. Kuffer, R. Sliuzas und C. Persello. „Machine Learning-Based Slum Mapping in Support of Slum Upgrading Programs: The Case of Bandung City, Indonesia“. en. In: *Remote Sensing* 10.10 (Sep. 2018), S. 1522.
- [121] N. Levashova, A. Sidorova, A. Semina und M. Ni. „A Spatio-Temporal Autowave Model of Shanghai Territory Development“. en. In: *Sustainability* 11.13 (Juli 2019), S. 3658.
- [122] E. H. Lieb und J. Yngvason. „A guide to entropy and the second law of thermodynamics“. In: *Statistical Mechanics*. Springer, 1998, S. 353–363.
- [123] R. Lilford, C. Kyobutungi, R. Ndugwa, J. Sartori, S. I. Watson, R. Sliuzas, M. Kuffer, T. Hofer, J. Porto de Albuquerque und A. Ezeh. „Because space matters: conceptual framework to help distinguish slum from non-slum urban areas“. en. In: *BMJ Global Health* 4.2 (Apr. 2019), e001267.
- [124] R. J. Lilford, O. Oyeboode, D. Satterthwaite, G. J. Melendez-Torres, Y.-F. Chen, B. Mberu, S. I. Watson, J. Sartori, R. Ndugwa, W. Caiaffa, T. Haregu, A. Capon, R. Saith und A. Ezeh. „Improving the health and welfare of people who live in slums“. en. In: *The Lancet* 389.10068 (Feb. 2017), S. 559–570.
- [125] R. Liu, M. Kuffer und C. Persello. „The Temporal Dynamics of Slums Employing a CNN-Based Change Detection Approach“. en. In: *Remote Sensing* 11.23 (Nov. 2019), S. 2844.
- [126] S. M. Low. „The edge and the center: Gated communities and the discourse of urban fear“. In: *American anthropologist* 103.1 (2001), S. 45–58.
- [127] N. Luhmann. *Soziale Systeme: Grundriß einer allgemeinen Theorie*. ger. 17. Auflage. Theorie der Gesellschaft Niklas Luhmann[...] Frankfurt am Main: Suhrkamp, 2018.

- [128] D. Madden. „Relative or absolute poverty lines: a new approach“. en. In: *Review of Income and Wealth* 46.2 (Juni 2000), S. 181–199.
- [129] R. Mahabir, A. Croitoru, A. Crooks, P. Agouris und A. Stefanidis. „A Critical Review of High and Very High-Resolution Remote Sensing Approaches for Detecting and Mapping Slums: Trends, Challenges and Emerging Opportunities“. en. In: *Urban Science* 2.1 (Jan. 2018), S. 8.
- [130] R. Mahabir, A. Crooks, A. Croitoru und P. Agouris. „The study of slums as social and physical constructs: challenges and emerging research opportunities“. en. In: *Regional Studies, Regional Science* 3.1 (Jan. 2016), S. 399–419.
- [131] P. Maini und M. Myerscough. „Boundary-driven instability“. en. In: *Applied Mathematics Letters* 10.1 (Jan. 1997), S. 1–4.
- [132] B. Marx, T. Stoker und T. Suri. „The Economics of Slums in the Developing World“. en. In: *Journal of Economic Perspectives* 27.4 (Nov. 2013), S. 187–210.
- [133] R. M. May. „Simple mathematical models with very complicated dynamics“. en. In: *Nature* 261.5560 (Juni 1976), S. 459–467.
- [134] A. Mayne. *Slums: the history of a global injustice*. London, UK: Reaktion Books Ltd, 2017.
- [135] E. Mayr. „Lamarck revisited“. In: *Journal of the History of Biology* 5.1 (1972). Publisher: Springer, S. 55–94.
- [136] R. I. McDonald, K. Weber, J. Padowski, M. Flörke, C. Schneider, P. A. Green, T. Gleeson, S. Eckman, B. Lehner, D. Balk, T. Boucher, G. Grill und M. Montgomery. „Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure“. en. In: *Global Environmental Change* 27 (Juli 2014), S. 96–105.
- [137] M. Meck, L. Rausch, J. Friesen, M. Wurm, H. Taubenböck, L. C. Altherr und P. F. Pelz. „Designing a water supply network for slums in Rio de Janeiro using Mixed Integer Programming“. In: *Operations Research Proceedings 2018*. Springer, 2019.
- [138] F. Medda, P. Nijkamp und P. Rietveld. „A morphogenetic perspective on spatial complexity“. In: *Complexity and spatial networks*. Springer, 2009, S. 51–60.
- [139] H. Meinhardt. „Turing’s theory of morphogenesis of 1952 and the subsequent discovery of the crucial role of local self-enhancement and long-range inhibition“. en. In: *Interface Focus* 2.4 (Aug. 2012), S. 407–416.

- [140] C. Menger. *Die Irrtümer des Historismus in der deutschen National-ökonomie*. Wien, 1884.
- [141] G. Minnameier und E. Schnebel. „Die Kreativität des Pragmatismus: Charles Sanders Peirce in der Serie „Philosophie für Manager““. In: *managerSeminare* 201 (2014), S. 58–61.
- [142] S. Mossoux, M. Kervyn, H. Soulé und F. Canters. „Mapping Population Distribution from High Resolution Remotely Sensed Imagery in a Data Poor Setting“. en. In: *Remote Sensing* 10.9 (Sep. 2018), S. 1409.
- [143] I. Müller, H. Taubenböck, M. Kuffer und M. Wurm. „Misperceptions of Predominant Slum Locations? Spatial Analysis of Slum Locations in Terms of Topography Based on Earth Observation Data“. en. In: *Remote Sensing* 12.15 (Aug. 2020), S. 2474.
- [144] C. J. L. Murray u. a. „Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019“. en. In: *The Lancet* 396.10258 (Okt. 2020), S. 1223–1249.
- [145] J. D. Murray. *Mathematical Biology II - Spatial Models and Biomedical Applications*. 3. Aufl. Bd. 18. Interdisciplinary applied Mathematics. Springer-Verlag New York, 2003.
- [146] V. Nitsch. „Zipf zipped“. en. In: *Journal of Urban Economics* 57.1 (Jan. 2005), S. 86–100.
- [147] K. Olthuis, J. Benni, K. Eichwede und C. Zevenbergen. „Slum Upgrading: Assessing the importance of location and a plea for a spatial approach“. en. In: *Habitat International* 50 (Dez. 2015), S. 270–288.
- [148] G. L. Ooi und K. H. Phua. „Urbanization and Slum Formation“. en. In: *Journal of Urban Health* 84.S1 (Mai 2007), S. 27–34.
- [149] K. E. Owens, S. Gulyani und A. Rizvi. „Success when we deemed it failure? Revisiting sites and services projects in Mumbai and Chennai 20 years later“. en. In: *World Development* 106 (Juni 2018), S. 260–272.
- [150] K. Page, P. K. Maini und N. A. Monk. „Pattern formation in spatially heterogeneous Turing reaction–diffusion models“. en. In: *Physica D: Nonlinear Phenomena* 181.1-2 (Juli 2003), S. 80–101.
- [151] C. Paola und M. Leeder. „Simplicity versus complexity“. en. In: *Nature* 469.7328 (Jan. 2011), S. 38–39.
- [152] P. Parikh, K. Fu, H. Parikh, A. McRobie und G. George. „Infrastructure Provision, Gender, and Poverty in Indian Slums“. en. In: *World Development* 66 (Feb. 2015), S. 468–486.

- [153] T. Parsons. „On building social system theory: A personal history“. In: *Daedalus* (1970). Publisher: JSTOR, S. 826–881.
- [154] A. Patel, N. Koizumi und A. Crooks. „Measuring slum severity in Mumbai and Kolkata: A household-based approach“. en. In: *Habitat International* 41 (Jan. 2014), S. 300–306.
- [155] N. Pearce und F. Merletti. „Complexity, simplicity, and epidemiology“. en. In: *International Journal of Epidemiology* 35.3 (Juni 2006), S. 515–519.
- [156] P. F. Pelz, P. Groche, M. E. Pfetsch und R. Platz. *Mastering Uncertainty in Mechanical Engineering*. Springer, 2021.
- [157] P. F. Pelz, J. Friesen und J. Hartig. „Similar size of slums caused by a Turing instability of migration behavior“. en. In: *Physical Review E* 99.2 (Feb. 2019).
- [158] Plato. *Der Staat - Politeia*. ger. Übers. von K. Vretska. Bibliograph. erg. Ausg. 2015. Reclams Universal-Bibliothek 8205. Stuttgart: Reclam, 2015.
- [159] J. Portugali. *Complexity, cognition and the city*. Springer complexity. Heidelberg ; New York: Springer, 2011.
- [160] R. D. Precht. *Sei du selbst*. ger. Geschichte der Philosophie Richard David Precht ; Bd. 3. München: Goldmann Verlag (HC), 2018.
- [161] I. Prigogine. „Time, Structure, and Fluctuations“. en. In: *Science* 201.4358 (Sep. 1978), S. 777–785.
- [162] I. Prigogine und F. Griesse. *Vom Sein zum Werden: Zeit und Komplexität in den Naturwissenschaften*. 6. Aufl., 14. - 15. Tsd, überarb. und erw. Neuausg-. München: Piper, 1992.
- [163] I. Prigogine und I. Stengers. *Dialog mit der Natur: neue Wege naturwissenschaftlichen Denkens*. ger. Übers. von F. Griesse. 7. Aufl., Neuausg. 1990, (2. Aufl. dieser Ausg.), 37. - 40. Tsd., (9. - 12. Tsd. dieser Ausg.) Serie Piper 1181. München: Piper, 1993.
- [164] R. M. Pringle und C. E. Tarnita. „Spatial Self-Organization of Ecosystems: Integrating Multiple Mechanisms of Regular-Pattern Formation“. en. In: *Annual Review of Entomology* 62.1 (Jan. 2017), S. 359–377.
- [165] B. Prokop. *Anwendung von Reaktions-Diffusions-Modellen auf die Entwicklung ruraler Besiedlung*. Techn. Ber. Darmstadt: TU Darmstadt, 2021.

- [166] R. Pulselli, C. Ratti und E. Tiezzi. „City out of chaos: Social patterns and organization in urban systems“. en. In: *International Journal of Ecodynamics* 1.2 (Aug. 2006), S. 126–135.
- [167] B. Purvis, Y. Mao und D. Robinson. „Entropy and its Application to Urban Systems“. en. In: *Entropy* 21.1 (Jan. 2019), S. 56.
- [168] J. M. Quigley und D. H. Weinberg. „Intra-Urban Residential Mobility: A Review and Synthesis“. en. In: *International Regional Science Review* 2.1 (Okt. 1977), S. 41–66.
- [169] E. Rains und A. Krishna. „Precarious gains: Social mobility and volatility in urban slums“. en. In: *World Development* 132 (Aug. 2020), S. 105001.
- [170] A. Rapoport. „Lewis F. Richardson’s mathematical theory of war“. In: *Conflict Resolution* 1.3 (1957). Publisher: Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, S. 249–299.
- [171] J. Raspopovic, L. Marcon, L. Russo und J. Sharpe. „Digit patterning is controlled by a Bmp-Sox9-Wnt Turing network modulated by morphogen gradients“. en. In: *Science* 345.6196 (Aug. 2014), S. 566–570.
- [172] L. Rausch. *Mathematische Optimierung von Wasserversorgungsnetzwerken für informelle Siedlungen in Mega Cities*. Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik 21. Darmstadt, 2019.
- [173] L. Rausch, J. Friesen, L. Altherr, M. Meck und P. Pelz. „A Holistic Concept to Design Optimal Water Supply Infrastructures for Informal Settlements Using Remote Sensing Data“. en. In: *Remote Sensing* 10.2 (Feb. 2018), S. 216.
- [174] L. Rausch, J. Friesen, L. C. Altherr und P. F. Pelz. „Using Mixed-Integer Programming for the Optimal Design of Water Supply Networks for Slums“. In: *Operations Research Proceedings 2017*. Springer, 2018, S. 509–516.
- [175] W. J. Reed. „On the Rank-Size Distribution for Human Settlements“. en. In: *Journal of Regional Science* 42.1 (Feb. 2002), S. 1–17.
- [176] W. J. Reed und M. Jorgensen. „The Double Pareto-Lognormal Distribution—A New Parametric Model for Size Distributions“. en. In: *Communications in Statistics - Theory and Methods* 33.8 (Dez. 2004), S. 1733–1753.

- [177] H. Ren, W. Guo, Z. Zhang, L. M. Kisovi und P. Das. „Population Density and Spatial Patterns of Informal Settlements in Nairobi, Kenya“. In: *Sustainability* 12.18 (2020). Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, S. 7717.
- [178] L. F. Richardson. „Mathematical Psychology of War“. en. In: *Nature* 136.3452 (Dez. 1935), S. 1025–1025.
- [179] A. Rodriguez und A. Laio. „Clustering by fast search and find of density peaks“. In: *Science* 344.6191 (Juni 2014), S. 1492.
- [180] D. Rodríguez und J. Torres. „Autopoiesis, die Einheit einer Differenz: Luhmann und Maturana“. In: *Wechselseitige Perzeptionen. Deutschland-Lateinamerika im 20. Jahrhundert* (2007), S. 79–108.
- [181] M. Roser. „Global Economic Inequality“. In: *Our World in Data* (2013).
- [182] H. Rosling, O. Rosling und A. R. Rönnlund. *Factfulness: ten reasons we're wrong about the world - and why things are better than you think*. English. 2019.
- [183] A. Roy. „Slumdog Cities: Rethinking Subaltern Urbanism: Rethinking subaltern urbanism“. en. In: *International Journal of Urban and Regional Research* 35.2 (März 2011), S. 223–238.
- [184] D. Roy und M. Lees. „Understanding resilience in slums using an agent-based model“. en. In: *Computers, Environment and Urban Systems* 80 (März 2020), S. 101458.
- [185] D. Roy, M. H. Lees, B. Palavalli, K. Pfeffer und M. A. P. Slood. „The emergence of slums: A contemporary view on simulation models“. In: *Environmental Modelling & Software* 59 (2014), S. 76–90.
- [186] S. H. Rudy, S. L. Brunton, J. L. Proctor und J. N. Kutz. „Data-driven discovery of partial differential equations“. en. In: *Science Advances* 3.4 (Apr. 2017), e1602614.
- [187] D. Saunders. *Die neue Völkerwanderung - Arrival City*. ger. Übers. von W. Roller. 1. Aufl. München: Pantheon, 2013.
- [188] E. Schmidt-Kallert. *Magnet Stadt: Urbanisierung im Globalen Süden*. ger. Lizenzausgabe für Bundeszentrale für Politische Bildung. Schriftenreihe / Bundeszentrale für Politische Bildung Band 10075. Bonn: Bundeszentrale für politische Bildung, 2017.
- [189] J. Schnakenberg. „Simple chemical reaction systems with limit cycle behaviour“. In: *Journal of Theoretical Biology* 81.3 (Dez. 1979), S. 389–400.

- [190] E. Schramm und J. Felmeden. „Towards more resilient water infrastructures“. In: *Resilient cities 2*. Springer, 2012, S. 177–186.
- [191] E. Schrödinger. *Was ist Leben? die lebende Zelle mit den Augen des Physikers betrachtet*. ger. Übers. von L. Mazurcak. 11. Aufl., ungekürzte Taschenbuchausg. Serie Piper 1134. München: Piper, 2011.
- [192] R. Sennett. *Die offene Stadt: eine Ethik des Bauens und Bewohnens*. Übers. von M. Bischoff. Sonderausgabe für die Bundeszentrale für Politische Bildung. Schriftenreihe Bundeszentrale für Politische Bildung Band 10485. Bonn: Bundeszentrale für Politische Bildung, 2019.
- [193] M. N. Shahbazi, E. D. Siggia und M. Zernicka-Goetz. „Self-organization of stem cells into embryos: A window on early mammalian development“. en. In: *Science* 364.6444 (Juni 2019), S. 948–951.
- [194] A. Siksná. „The effects of block size and form in North American and Australian city centres“. In: *Urban morphology* 1.1 (1997), S. 19–33.
- [195] G. Simmel. *Die Großstädte und das Geistesleben*. e-artnow, 2014.
- [196] D. Sims, M. Sejourne und M. El Shorbagi. „Cairo, Egypt“. In: *Understanding Urban Slums* (2003).
- [197] M. L. Small. „De-Exoticizing Ghetto Poverty: On the Ethics of Representation in Urban Ethnography“. en. In: *City & Community* 14.4 (Dez. 2015), S. 352–358.
- [198] R. E. Snyder, G. Jaimes, L. W. Riley, E. Faerstein und J. Corburn. „A Comparison of Social and Spatial Determinants of Health Between Formal and Informal Settlements in a Large Metropolitan Setting in Brazil“. en. In: *Journal of Urban Health* 91.3 (Juni 2014), S. 432–445.
- [199] R. E. Snyder, M. A. Marlow, M. E. Phuphanich, L. W. Riley und E. L. N. Maciel. „Risk factors for differential outcome following directly observed treatment (DOT) of slum and non-slum tuberculosis patients: a retrospective cohort study“. en. In: *BMC Infectious Diseases* 16.1 (Dez. 2016).
- [200] C. Song, Z. Qu, N. Blumm und A.-L. Barabási. „Limits of Predictability in Human Mobility“. en. In: *Science* 327.5968 (Feb. 2010), S. 1018–1021.
- [201] C. Song, T. Koren, P. Wang und A.-L. Barabási. „Modelling the scaling properties of human mobility“. en. In: *Nature Physics* 6.10 (Okt. 2010), S. 818–823.
- [202] J. H. Spurk. *Dimensionsanalyse in der Strömungslehre*. Springer-Verlag, 2013.

- [203] H. Taubenböck, T. Esch, A. Felbier, M. Wiesner, A. Roth und S. Dech. „Monitoring urbanization in mega cities from space“. en. In: *Remote Sensing of Environment* 117 (Feb. 2012), S. 162–176.
- [204] H. Taubenböck, M. Weigand, T. Esch, J. Staab, M. Wurm, J. Mast und S. Dech. „A new ranking of the world’s largest cities—Do administrative units obscure morphological realities?“ en. In: *Remote Sensing of Environment* 232 (Okt. 2019), S. 111353.
- [205] H. Taubenböck, M. Wurm, N. Setiadi, N. Gebert, A. Roth, G. Strunz, J. Birkmann und S. Dech. „Integrating remote sensing and social science“. In: *2009 Joint Urban Remote Sensing Event*. Shanghai, China: IEEE, Mai 2009, S. 1–7.
- [206] H. Taubenböck. „Ohne Limit? Die Expansion von Megacities“. de. In: *Globale Urbanisierung*. Hrsg. von H. Taubenböck, M. Wurm, T. Esch und S. Dech. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 49–58.
- [207] H. Taubenböck und N. J. Kraff. „The physical face of slums: a structural comparison of slums in Mumbai, India, based on remotely sensed data“. In: *Journal of Housing and the Built Environment* 29.1 (2014), S. 15–38.
- [208] H. Taubenböck, N. J. Kraff und M. Wurm. „The morphology of the Arrival City - A global categorization based on literature surveys and remotely sensed data“. en. In: *Applied Geography* 92 (März 2018), S. 150–167.
- [209] H. Taubenböck, J. Staab, X. Zhu, C. Geiß, S. Dech und M. Wurm. „Are the Poor Digitally Left Behind? Indications of Urban Divides Based on Remote Sensing and Twitter Data“. en. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7.8 (Juli 2018), S. 304.
- [210] H. Taubenböck und M. Wurm. „Ich weiß, dass ich nichts weiß – Bevölkerungsschätzung in der Megacity Mumbai“. de. In: *Globale Urbanisierung*. Hrsg. von H. Taubenböck, M. Wurm, T. Esch und S. Dech. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 171–178.
- [211] G. Theraulaz, E. Bonabeau, S. C. Nicolis, R. V. Sole, V. Fourcassie, S. Blanco, R. Fournier, J.-L. Joly, P. Fernandez, A. Grimal, P. Dalle und J.-L. Deneubourg. „Spatial patterns in ant colonies“. en. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99.15 (Juli 2002), S. 9645–9649.

- [212] D. R. Thomson, M. Kuffer, G. Boo, B. Hati, T. Grippa, H. Elsey, C. Linard, R. Mahabir, C. Kyobutungi, J. Maviti, D. Mwaniki, R. Ndugwa, J. Makau, R. Sliuzas, S. Cheruiyot, K. Nyambuga, N. Mboga, N. W. Kimani, J. P. de Albuquerque und C. Kabaria. „Need for an Integrated Deprived Area “Slum” Mapping System (IDEAMAPS) in Low- and Middle-Income Countries (LMICs)“. en. In: *Social Sciences* 9.5 (Mai 2020), S. 80.
- [213] D. R. Thomson, D. A. Rhoda, A. J. Tatem und M. C. Castro. „Gridded population survey sampling: a systematic scoping review of the field and strategic research agenda“. en. In: *International Journal of Health Geographics* 19.1 (Dez. 2020).
- [214] T. Tiessen, J. Friesen, L. Rausch und P. F. Pelz. „Using remote sensing data and cluster algorithms to structure cities“. In: *2019 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*. Vannes, France: IEEE, Mai 2019, S. 1–4.
- [215] J. Tolksdorf, D. Lu und P. Cornel. „First implementation of a SEMI-ZENTRAL resource recovery center“. en. In: *Journal of Water Reuse and Desalination* 6.4 (Dez. 2016), S. 466–475.
- [216] C. Tonne, L. Adair, D. Adlakha, I. Anguelovski, K. Belesova, M. Berger, C. Brelsford, P. Dadvand, A. Dimitrova, B. Giles-Corti, A. Heinz, N. Mehran, M. Nieuwenhuijsen, F. Pelletier, O. Ranzani, M. Rodenstein, D. Rybski, S. Samavati, D. Satterthwaite, J. Schöndorf, D. Schreckenberger, J. Stollmann, H. Taubenböck, G. Tiwari, B. van Wee und M. Adli. „Defining pathways to healthy sustainable urban development“. en. In: *Environment International* 146 (Jan. 2021), S. 106236.
- [217] J. L. Toole, C. Herrera-Yaqué, C. M. Schneider und M. C. González. „Coupling human mobility and social ties“. en. In: *Journal of The Royal Society Interface* 12.105 (Apr. 2015), S. 20141128.
- [218] A. M. Turing. „Computing Machinery and Intelligence“. en. In: *Mind* LIX.236 (Okt. 1950), S. 433–460.
- [219] A. M. Turing. „On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem“. en. In: *Proceedings of the London Mathematical Society* s2-42.1 (1937), S. 230–265.
- [220] A. M. Turing. „The Chemical Basis of Morphogenesis“. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 237.641 (1952), S. 37–72.

- [221] R. Turley, R. Saith, N. Bhan, E. Rehfuess und B. Carter. „Slum upgrading strategies involving physical environment and infrastructure interventions and their effects on health and socio-economic outcomes“. en. In: *Cochrane Database of Systematic Reviews* (Jan. 2013). Hrsg. von Cochrane Public Health Group.
- [222] United Nations. *Urbanization and development: emerging futures. World cities report*. English. New York: United Nations Publicatio, 2016.
- [223] United Nations, Department of Economic and Social Affairs und Population Division. *World urbanization prospects: the 2018 revision*. English. 2019.
- [224] United Nations Human Settlements Programme. *The challenge of slums: global report on human settlements, 2003*. Earthscan/James & James, 2003.
- [225] V. K. Vanag und I. R. Epstein. „Cross-diffusion and pattern formation in reaction–diffusion systems“. en. In: *Phys. Chem. Chem. Phys.* 11.6 (2009), S. 897–912.
- [226] F. Varela, H. Maturana und R. Uribe. „Autopoiesis: The organization of living systems, its characterization and a model“. en. In: *Biosystems* 5.4 (Mai 1974), S. 187–196.
- [227] R. Vigil, Q. Ouyang und H. L. Swinney. „Turing patterns in a simple gel reactor“. en. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 188.1-3 (Sep. 1992), S. 17–25.
- [228] J.-P. Voroney, A. Lawniczak und R. Kapral. „Turing pattern formation in heterogenous media“. en. In: *Physica D: Nonlinear Phenomena* 99.2-3 (Dez. 1996), S. 303–317.
- [229] J. Wang, M. Kuffer, D. Roy und K. Pfeffer. „Deprivation pockets through the lens of convolutional neural networks“. en. In: *Remote Sensing of Environment* 234 (Dez. 2019), S. 111448.
- [230] M. Weber. *Die Stadt*. ger. Hrsg. von W. Nippel. Studienausgabe der Max-Weber-Gesamtausgabe Schriften und Reden Wirtschaft und Gesellschaft Max Weber ; Abt. 1 Bd. 22 : die Wirtschaft und die gesellschaftlichen Ordnungen und Mächte. Nachlaß ; Teilbd. 5. Tübingen: Mohr, 2000.
- [231] G. B. West. *Scale: the universal laws of growth, innovation, sustainability, and the pace of life in organisms, cities, economies, and companies*. Penguin, 2017.

- [232] L. Wirth. „Urbanism as a Way of Life“. In: *American journal of sociology* 44.1 (1938). Publisher: University of Chicago Press, S. 1–24.
- [233] L. Wolpert. „Positional information and the spatial pattern of cellular differentiation“. en. In: *Journal of Theoretical Biology* 25.1 (Okt. 1969), S. 1–47.
- [234] World Health Organization. „A billion voices: listening and responding to the health needs of slum dwellers and informal settlers in new urban settings: World Health Organization“. In: *Centre for Health Development* (2005).
- [235] World Health Organization. „Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2017 update and SDG baselines“. In: (2017). Publisher: World Health Organization.
- [236] M. Wurm, T. Stark, X. X. Zhu, M. Weigand und H. Taubenböck. „Semantic segmentation of slums in satellite images using transfer learning on fully convolutional neural networks“. en. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 150 (Apr. 2019), S. 59–69.
- [237] M. Wurm und H. Taubenböck. „Detecting social groups from space – Assessment of remote sensing-based mapped morphological slums using income data“. en. In: *Remote Sensing Letters* 9.1 (Jan. 2018), S. 41–50.
- [238] M. Wurm, H. Taubenböck, M. Weigand und A. Schmitt. „Slum mapping in polarimetric SAR data using spatial features“. en. In: *Remote Sensing of Environment* 194 (Juni 2017), S. 190–204.
- [239] H. Zhao, B. D. Storey, R. D. Braatz und M. Z. Bazant. „Learning the Physics of Pattern Formation from Images“. en. In: *Physical Review Letters* 124.6 (Feb. 2020).
- [240] Z. Zhu, Y. Zhou, K. C. Seto, E. C. Stokes, C. Deng, S. T. Pickett und H. Taubenböck. „Understanding an urbanizing planet: Strategic directions for remote sensing“. en. In: *Remote Sensing of Environment* 228 (Juli 2019), S. 164–182.
- [241] G. K. Zipf. *National Unity and Disunity - The Nation As a Bio-Social Organism*. Bloomington, Indiana, 1941.
- [242] E. M. Zulu, D. Beguy, A. C. Ezech, P. Bocquier, N. J. Madise, J. Cleland und J. Falkingham. „Overview of migration, poverty and health dynamics in Nairobi City’s slum settlements“. en. In: *Journal of Urban Health* 88.S2 (Juni 2011), S. 185–199.

Anhang A

Anhang

A.1 Alternative Entdimensionierung und Reaktionskinetik

Die in Kapitel 3 aufgeführte Gleichung 3.5 beschreibt die Änderung der Bevölkerungsdichten in differentieller Form und ist im Folgenden nochmals aufgeführt

$$\begin{aligned}\frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial t} &= \hat{U} \hat{R} f_1(u_1, u_2) + D_1 \Delta \tilde{u}_1, \\ \frac{\partial \tilde{u}_2}{\partial t} &= \hat{U} \hat{R} f_2(u_1, u_2) + D_2 \Delta \tilde{u}_2.\end{aligned}\tag{A.1}$$

Um das zeitliche Verhalten dieser Gleichung mithilfe von Simulationen untersuchen zu können, bietet sich folgende Entdimensionierung mit $t := \tilde{t} D_1 / L^2$, $x_j := \tilde{x}_j L$, $u_i := \tilde{u}_i / \hat{U}$ und $\gamma = \hat{R} L^2 / D_1$ an¹. Dies führt zu folgender dimensionslosen Reaktions-Diffusions-Gleichung

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = \gamma f_i(u_j) + d_{ij} \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_k \partial x_k}, (d_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & d \end{pmatrix}\tag{A.2}$$

die in einem Gebiet der Länge L betrachtet wird.

Als Reaktionskinetik wird in dieser Arbeit die Aktivator-Substrat-Kinetik nach Schnakenberg² verwendet, die durch folgende Gleichungen

¹ MURRAY, *Mathematical Biology II - Spatial Models and Biomedical Applications*, ([145], 2003)

² SCHNAKENBERG, „Simple chemical reaction systems with limit cycle behaviour“, ([189], 1979)

$$\begin{aligned} f_1(u_1, u_2) &= c_1 - u_1 + u_1^2 u_2 \\ f_2(u_1, u_2) &= c_2 - u_1^2 u_2 \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

repräsentiert wird.

Die Gleichungen der Reaktionskinetik sind in dimensionsloser Form angegeben³. Die Produktion f_1 des Aktivators u_1 geschieht einerseits kontinuierlich mit c_1 und andererseits in autokatalytischer Wechselwirkung mit dem Substrat $u_1^2 u_2$. Weiterhin wird die Produktion f_1 in Abhängigkeit der Konzentration u_1 vermindert. Das Substrat u_2 wird wiederum in f_2 kontinuierlich mit c_2 gebildet und zur Erzeugung des Aktivators u_1 im Term $u_1^2 u_2$ verbraucht.

Die zur Beschreibung eines stabilen Zustandes notwendige homogene Lösung $f_i(U_j) = 0$ kann im Fall der Schnakenberg-Kinetik analytisch ermittelt werden

$$\begin{aligned} U_1 &= c_1 + c_2 \\ U_2 &= \frac{c_2}{(c_1 + c_2)^2}. \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Auch die als Verhaltensmatrix interpretierte Jakobi-Matrix a_{ij} kann ebenfalls in Abhängigkeit der beiden Parameter c_1 und c_2 dargestellt werden

$$(a_{ij}) = \begin{pmatrix} (c_2 - c_1)/(c_1 + c_2) & (c_1 + c_2)^2 \\ -2(c_1 + c_2) & -(c_1 + c_2)^2 \end{pmatrix}. \quad (\text{A.5})$$

Erfüllen die beiden Parameter c_1 und c_2 die in den Gleichungen 3.7 und 3.8 aufgeführten Bedingungen, ist das System unter Abwesenheit von Diffusion stabil.

³ Dimensionsbehaftete Versionen der Gleichungen, sowie die den Reaktionskinetiken zugrundeliegenden Reaktionsgleichungen sind bei Schnakenberg [189] oder bei Murray [145] zu finden.

Informationen zu Abbildungen und Simulationen

Zwei der in der Arbeit aufgeführten Abbildungen wurden mit der in Kapitel 3 vorgestellten entdimensionierten Form der Reaktions-Diffusionsgleichung mit der Schnakenberg Kinetik erstellt. Die dafür verwendeten Parameter sind in Tabelle A.1 aufgeführt.

Tabelle A.1 – Parameter in den aufgeführten Abbildungen.

Abbildung	d	c_1	c_2
Dispersionsrelation in Abb. 3.3	$d_u = 30, d_c = 45.9, d_o = 150$	0.3	0.5
Dispersionsrelation in Abb. 5.1	200	0.3	0.5

Die dargestellten Simulationen wurden mit der Simulationssoftware FlexPDE 6 unter Verwendung der oben (Abschnitt A.1) aufgeführten Entdimensionierung durchgeführt. Die Parameter der durchgeführten Simulationen sind in folgender Tabelle A.2 dargestellt.

Tabelle A.2 – Parameter in den durchgeführten Simulationen.

Simulation	L	d	c_1	c_2	γ	t
Abbildung 3.4	1.5	200	0.3	0.5	20000	50
Abbildung 3.5	25	95	0.3	0.5	150	0.6, 0.7, 1, 10
Abbildung 5.2, (i)	1.425	200	0.3	0.5	20000	50

A.2 Kontextuelle Darstellungen morphologischer Slums

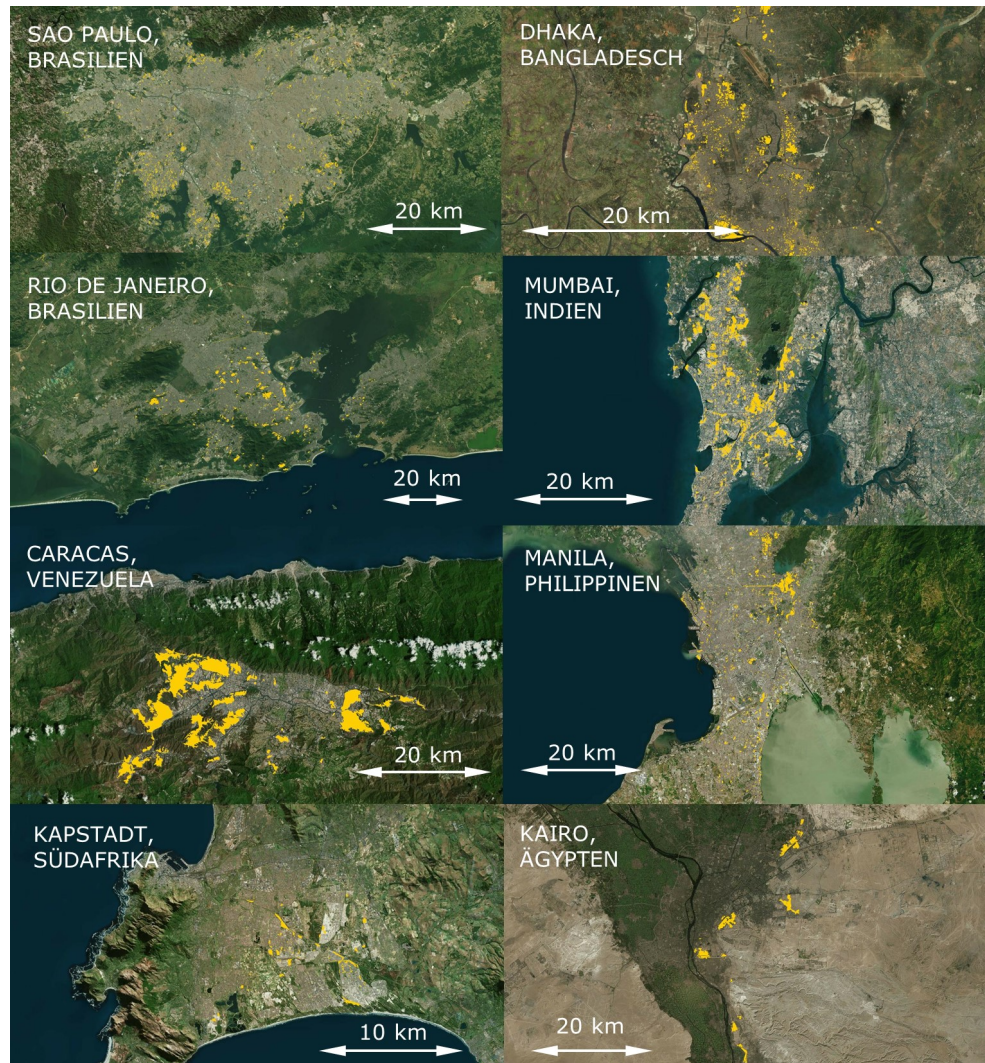


Abbildung A.1 – Darstellung der morphologischen Slums in den untersuchten Städten. Die Daten sind mit Hilfe von QGis dargestellt. Die im Hintergrund dargestellten Satellitendaten stammen von Bing Aerial Maps und wurden am 26. Januar 2021 abgerufen. ©2021 Microsoft Corporation Earthstar Geographics SIO.

Eigene Veröffentlichungen

Publikationen

- [1] J. Friesen, V. Friesen, I. Dietrich und P. F. Pelz. „Slums, Space, and State of Health—A Link between Settlement Morphology and Health Data“. en. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17.6 (März 2020), S. 2022.
- [2] J. Friesen, J. Hartig, K. Henn und P. F. Pelz. „Diffusion-driven demographics – Turing model as a concept for the emergence of sedentism“. In: *arXiv:2005.05107 [nlin, physics:physics, q-bio]* (Mai 2020).
- [3] J. Friesen, J. Hartig und P. F. Pelz. „Revisiting the Mechanism Behind the Similar Size of Slums“. In: *Preprints.org* (Dez. 2020).
- [4] J. Friesen, C. Knoche, J. Hartig, P. F. Pelz, H. Taubenböck und M. Wurm. „Sensitivity of slum size distributions as a function of spatial parameters for slum classification“. In: *2019 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*. Vannes, France: IEEE, Mai 2019, S. 1–4.
- [5] J. Friesen, M. Lestakova, J. Kaltenmorgen, S. Nahaganeshan, P. F. Pelz, H. Taubenböck und M. Wurm. „Size Distributions for Morphological Slums in Asia and South America“. In: *2019 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*. Vannes, France: IEEE, Mai 2019, S. 1–4.
- [6] J. Friesen und P. F. Pelz. „COVID-19 and Slums: A Pandemic Highlights Gaps in Knowledge About Urban Poverty“. en. In: *JMIR Public Health and Surveillance* 6.3 (Sep. 2020), e19578.
- [7] J. Friesen, L. Rausch, P. Pelz und J. Fürnkranz. „Determining Factors for Slum Growth with Predictive Data Mining Methods“. In: *Urban Science* 2.3 (2018), S. 81.
- [8] J. Friesen, L. Rausch und P. F. Pelz. „Providing water for the poor - towards optimal water supply infrastructures for informal settlements by using remote sensing data“. In: IEEE, März 2017, S. 1–4.

- [9] J. Friesen, H. Taubenböck, M. Wurm und P. F. Pelz. „Size distributions of slums across the globe using different data and classification methods“. en. In: *European Journal of Remote Sensing* (März 2019), S. 1–13.
- [10] J. Friesen, H. Taubenböck, M. Wurm und P. F. Pelz. „The similar size of slums“. en. In: *Habitat International* 73 (März 2018), S. 79–88.
- [11] J. Friesen, R. Tessmann und P. Pelz. „Reaction-diffusion Model Describing the Morphogenesis of Urban Systems in the US:“. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*. Heraklion, Crete, Greece: SCITEPRESS - Science und Technology Publications, 2019, S. 88–96.
- [12] J. Hartig, J. Friesen und P. F. Pelz. „Spatial relations of slums: size of slum clusters“. In: *2019 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*. Vannes, France: IEEE, Mai 2019, S. 1–4.
- [13] K. Henn, J. Friesen, J. Hartig und P. F. Pelz. „Spatial Analysis of Settlement Structures to Identify Pattern Formation Mechanisms in Inter-Urban Systems“. en. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9.9 (Sep. 2020), S. 541.
- [14] M. Meck, L. Rausch, J. Friesen, M. Wurm, H. Taubenböck, L. C. Altherr und P. F. Pelz. „Designing a water supply network for slums in Rio de Janeiro using Mixed Integer Programming“. In: *Operations Research Proceedings 2018*. Springer, 2019.
- [15] P. F. Pelz, J. Friesen und J. Hartig. „Similar size of slums caused by a Turing instability of migration behavior“. en. In: *Physical Review E* 99.2 (Feb. 2019).
- [16] L. Rausch, J. Friesen, L. Altherr, M. Meck und P. Pelz. „A Holistic Concept to Design Optimal Water Supply Infrastructures for Informal Settlements Using Remote Sensing Data“. en. In: *Remote Sensing* 10.2 (Feb. 2018), S. 216.
- [17] L. Rausch, J. Friesen, L. C. Altherr und P. F. Pelz. „Using Mixed-Integer Programming for the Optimal Design of Water Supply Networks for Slums“. In: *Operations Research Proceedings 2017*. Springer, 2018, S. 509–516.
- [18] T. Tiessen, J. Friesen, L. Rausch und P. F. Pelz. „Using remote sensing data and cluster algorithms to structure cities“. In: *2019 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*. Vannes, France: IEEE, Mai 2019, S. 1–4.